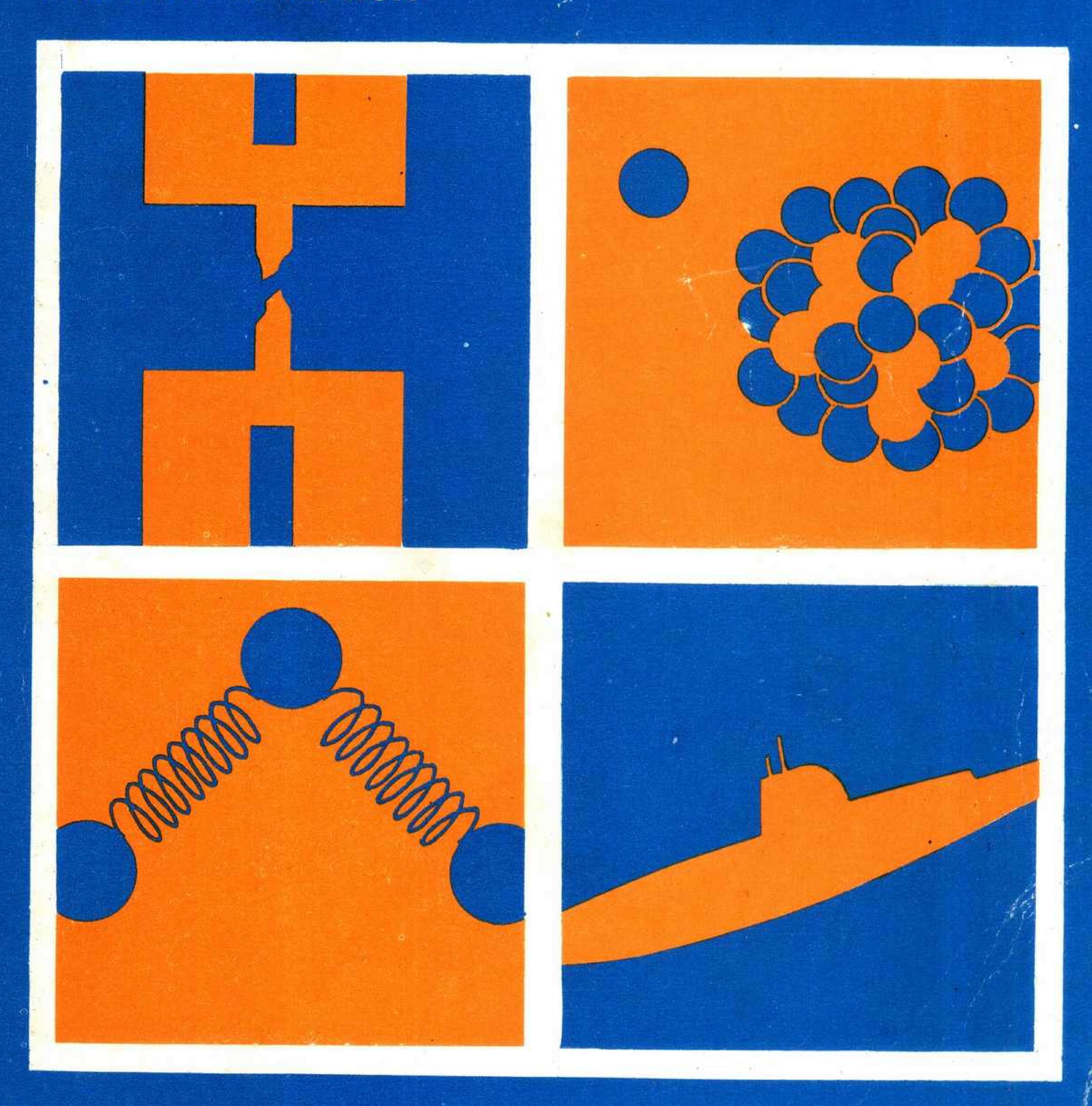
EL MUNDO DE LA ENERGIA NUCLEAR

ALEXANDER EFRON



S. A. EDITORIAL BELL



ALEXANDER EFRON
ING. EN ELECTRICIDAD, DR. EN FISICA
EX PRESIDENTE DEL DEPARTAMENTO
DE FISICA DE LA ESCUELA SUPERIOR
STUYVESANT NUEVA YORK.

EL MUNDO DE LA ENERGIA NUCLEAR

TRADUCCION DEL LIBRO
"EXPLORING MATTER AND
NUCLEAR ENERGY"
REALIZADA POR
JORGE R. JAUREGUI

S. A. EDITORIAL
Bell
SANTANDER 735
BUENOS AIRES

Título de la versión original inglesa, impresa en los Estados Unidos de Norteamérica: EXPLORING MATTER AND NUCLEAR ENERGY of Alexander Efron E. E., Ph. D.

Tarjeta de Catálogo en la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos Nº 69-19515.

Distribuidores exclusivos en España
EDICIONES TECNICAS MARCOMBO S. A.

IMPRESO EN LA ARGENTINA
PRINTED IN ARGENTINA

ESTE LIBRO SE TERMINO DE IMPRIMIR EL DIA 26 DE JULIO DE 1971, EN LOS TALLERES GRAFICOS DE SEBASTIAN DE AMORRORTU E HIJOS, LUCA 2223, BUENOS AIRES.
171-33

Introducción

La energía nuclear será una fuente de suma importancia dentro del cuadro general de la energía, en un futuro no demasiado distante. Se espera que para 1975, proveerá aproximadamente el 7,5 % de un total aproximado de dos billones de kWh de energía producida. Más adelante, para el año 2000, las proyecciones indican que la contribución nuclear puede representar más del 50 % de una demanda total de energía que se calcula en unos ocho billones de kWh. Para comprender los progresos actuales y futuros en este campo, debemos llegar a saber más respecto del átomo, la energía encerrada en su núcleo y los principios que gobiernan la liberación de esta energía por fisión de los átomos pesados y fusión de los más livianos.

En el Capítulo 1 analizamos la estructura y las propiedades de la materia en sus tres estados diferentes. En el Capítulo 2 se efectúa un resumen de la historia del pensamiento respecto del átomo así como de su estructura, hasta la fecha insospechada. Se explica en detalles la historia del electrón, el protón y el neutrón, bloques constructivos fundamentales de la materia, y posteriormente se efectúa una descripción de la radioactividad natural, los contadores y detectores más simples de la radiación (de primer nivel), los diversos modelos atómicos y sus limitaciones, los núcleos e isótopos y su separación. En el Capítulo 3 se presenta la relación de Einstein entre masa y energía, los conceptos de la energía de ligadura y el defecto de masa, los experimentos antiguos y más modernos sobre transformaciones nucleares, y los aceleradores de alta energía. Además, se cubre el tema de los contadores y detectores más perfeccionados (tratamiento de segundo nivel), se discute la radiación y la física sanitaria, y se considera la investigación y los reactores de energía del tipo de fisión y en grado más limitado, los de fusión o reactores de plasma, todavía en estudio. En el Apéndice se vuelve a examinar el tema de la estructura atómica —tanto nuclear como extranuclear— y se desarrolla el punto de vista físico moderno del átomo, derivado de los principios de la mecánica ondulatoria y de la teoría cuántica.

La reconsideración de algunos de los conceptos y fenómenos mencionados en los capítulos precedentes, es un ejemplo de un método de enseñanza que el autor denomina "en espiral" y que durante muchos años ha resultado ser altamente exitoso. El método en espiral o cíclico se basa en una exposición preliminar destinada a proporcionar al estudiante un tratamiento descriptivo y cualitativo del tema y luego un repaso del mismo en un nivel superior a fin de que él realice una exploración más detallada y matemática del mismo y asimile varias nuevas abstracciones. La vista panorámica inicial suscita interés por el tema, refuerza la motivación y conduce directamente a una comprensión más firme y más madura.

El texto se complementa en todo momento con descripciones de los experimentos fundamentales, cuestionarios y problemas que el lector puede utilizar para evaluar por sí mismo sus progresos, y también con fotograbados, dibujos lineales, etc. El uso de dos colores en muchos de los diagramas es otra ayuda importante.

La Hayden Modern Physics Series (Serie de Física Moderna de Hayden) a la cual pertenece el presente volumen, brinda una reseña rigurosamente exacta pero al mismo tiempo muy accesible de los campos más importantes de la física.

INDICE GENERAL

ANATOMIA DE LA MATERIA

1

1 NATURALEZA GRANULAR DE LA MATERIA

El filósofo griego Demócrito y el poeta romano Lucrecio fueron los primeros en proclamar que el mundo físico estaba compuesto por un espacio vacío y partículas indivisibles denominadas *átomos*. La primera teoría atómica satisfactoria fue desarrollada en 1808 por el químico inglés John Dalton, en la cual aun se consideraba indivisible al átomo. Hacia fines del siglo XIX, el fenómeno de la radioactividad condujo a la creencia de que ciertos átomos eran complejos en cuanto a su estructura y en consecuencia capaces de una subdivisión espontánea. Además, más adelante, se demostró que la energía era de carácter granular o discontinuo.

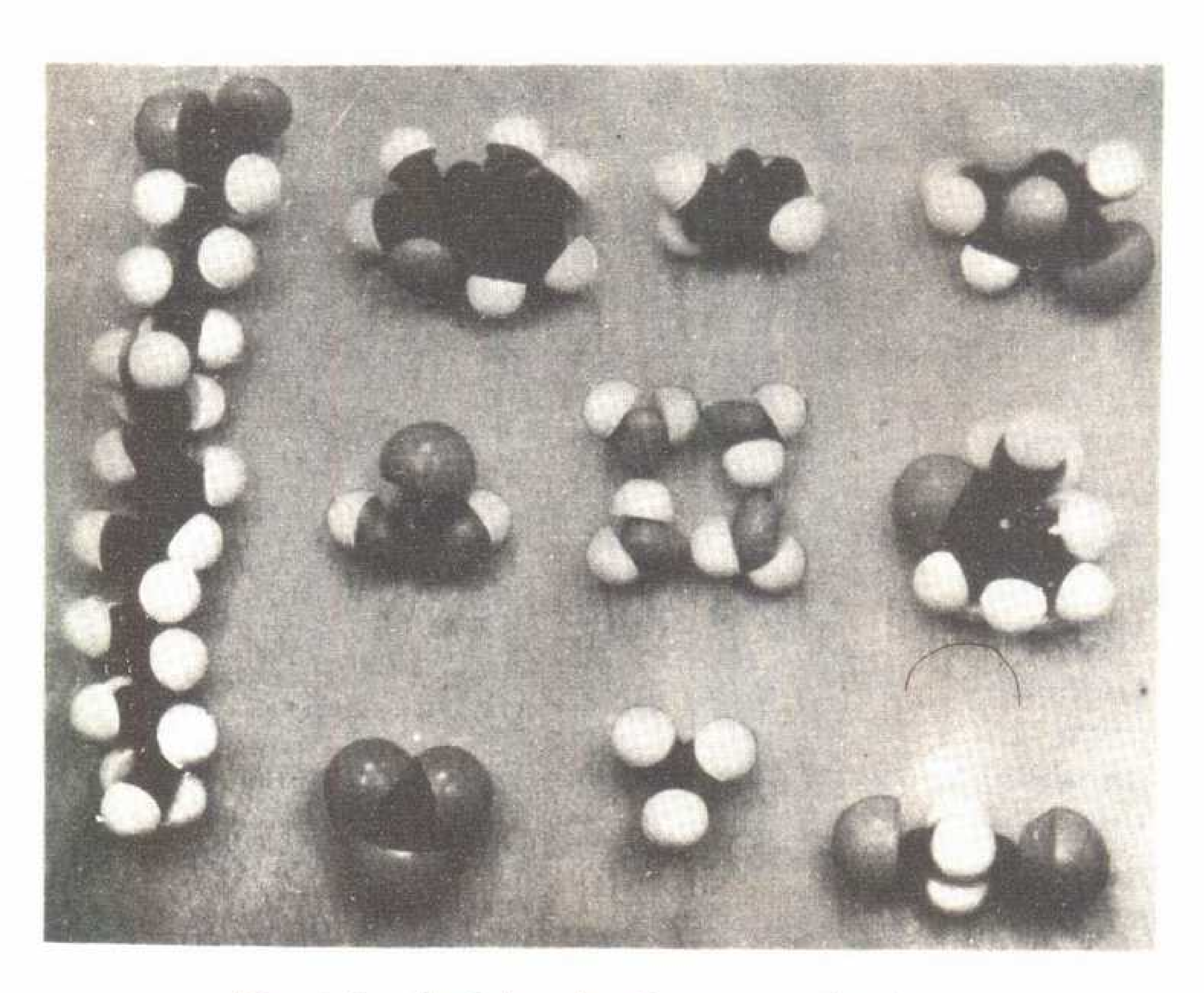


Fig. 1-1. Modelos de diversas moléculas.

Con respecto a los estados líquidos y gaseosos de la materia, es probable que encontremos *moléculas* mas bien que átomos. Podemos definir a una molécula

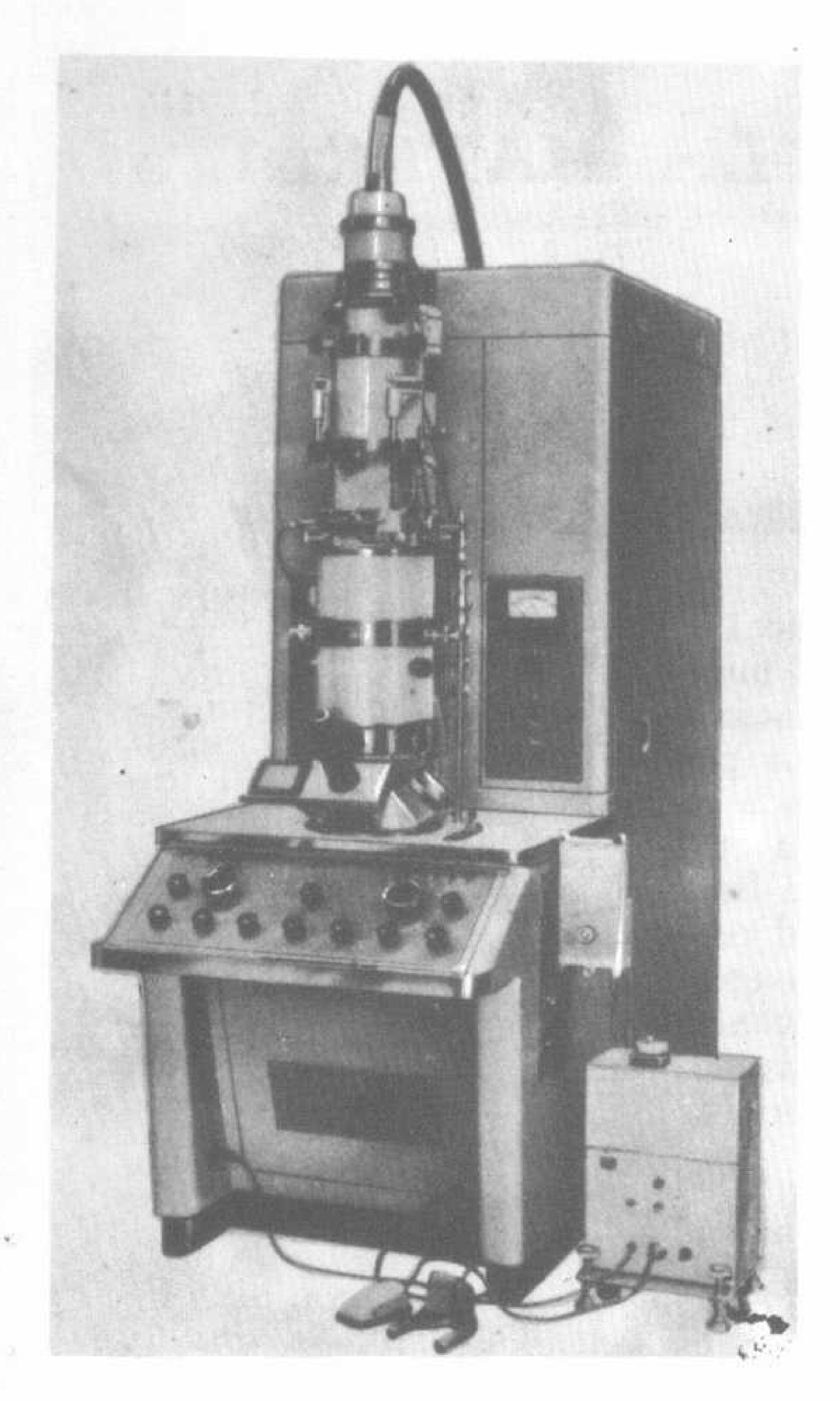


Fig. 1-2. Microscopio electrónico tipo JEM-6A; resolución hasta 1-8 Å; amplifica fotográficamente hasta 1.000.000 de veces.

como un agrupamiento eléctricamente neutro de dos o más átomos de elementos químicos iguales o diferentes unidos entre sí en proporción definida. Las moléculas varían considerablemente en cuanto a su forma y disposición interna, tal como se presume mediante los modelos ilustrados en la fig. 1-1. Las moléculas individuales escapan a la detección aun con el potente *microscopio electrónico* (fig. 1-2) que amplía, tanto visual como fotográficamente hasta un millón de diámetros. Por otra parte, las enormes *agrupaciones* moleculares, tales como las del virus en mosaico del tabaco, pueden ser fácilmente observadas con este instrumento (fig. 1-3). Mediante el *microscopio iónico de campo* recientemente perfeccionado se logra la tarea aparentemente imposible de observar a los átomos propiamente dichos (fig. 1-4).

2 PROPIEDADES DE LOS GASES

Comenzamos con el estado gaseoso debido a que es el estado de la materia mejor conocido por los físicos. Los líquidos son bastante más complejos en cuanto a su carácter y solo recientemente se ha comenzado a investigar el estado sólido.

Los gases son mezclas de moléculas ampliamente separadas en un estado de movimiento constante y al azar. Los gases *ideales* pueden considerarse como formados por moléculas *puntuales* o sin *dimensiones*. En los gases reales, los diámetros moleculares varían desde aproximadamente 2 a 4 cien millonésimos de centímetro [2 a 4 unidades *angstrom* (Å)]. La distancia promedio entre las moléculas ga-

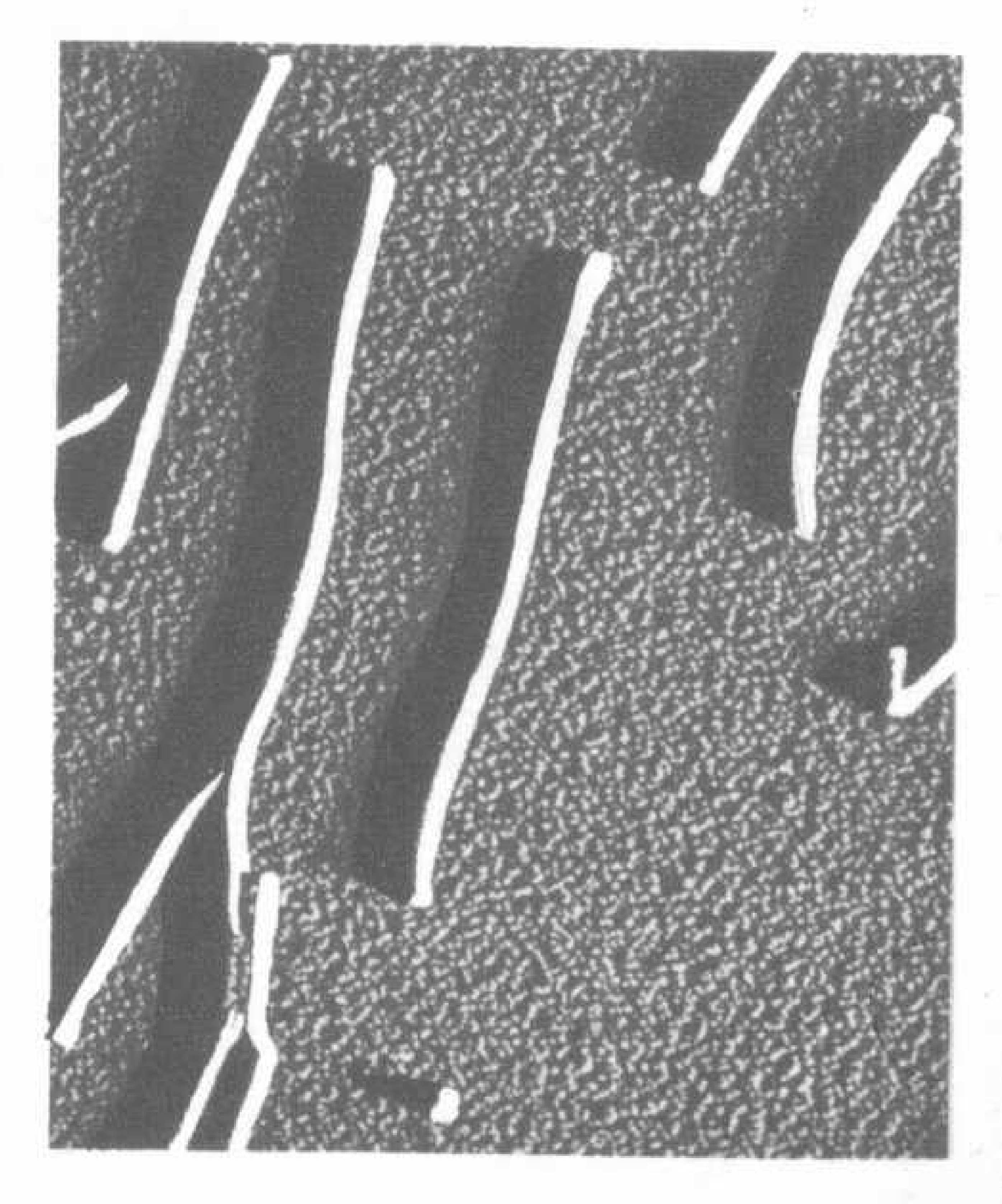


Fig. 1-3. Virus de mosaico del tabaco ampliado 30.000 veces, fotográficamente hasta 200.000 veces

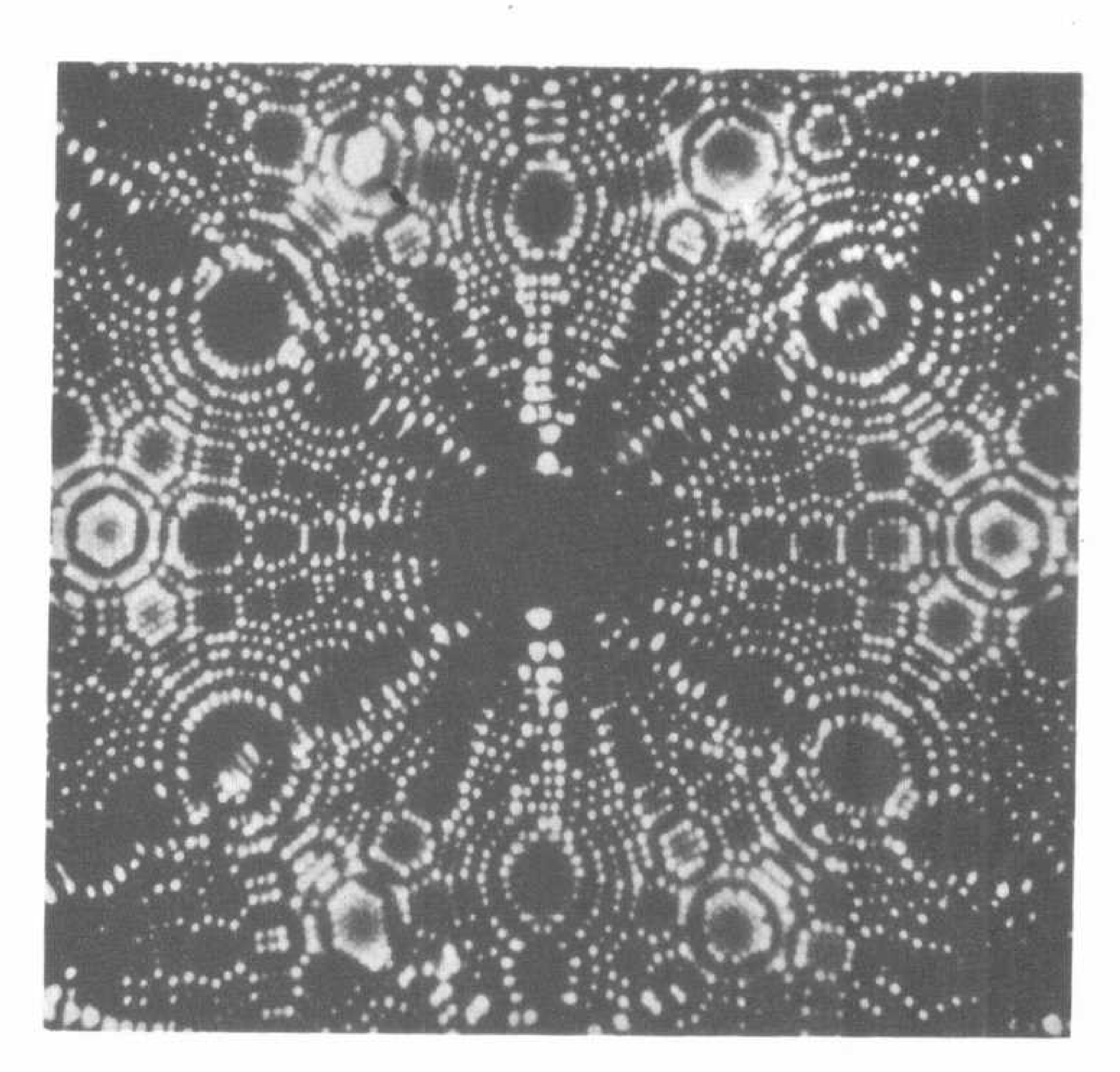


Fig. 1-4. Fotografía de un cristal de tungsteno ampliado 2.700.000 veces mediante el microscópico iónico de campo de Muller. Cala punto luminoso es un átomo de materia.

seosas a la presión atmosférica normal es de aproximadamente 30 Å o sea 10 veces el diámetro molecular promedio. La porción despreciable del volumen de gas total ocupado por las moléculas propiamente dichas puede justificar que se denominen vacíos a los gases, si bien los espacios interestelares son bastante más vacíos. Es interesante hacer notar que aun con un vacío ultra alto de laboratorio, quedan aproximadamente 10^3 (1.000) moléculas gaseosas en cada centímetro cúbico de espacio "evacuado".

Debido a los grandes espacios intermoleculares, los gases pueden ser fácilmente comprimidos o reducidos en cuanto a su volumen. Si se disminuye la presión externa, los gases se expansionan, diseminándose por todo el espacio que tienen a su alrededor. Las notables variaciones en cuanto al volumen se logran mediante variaciones de temperatura así como de presión.

¿Cuál es la evidencia que podemos hallar para comprobar el movimiento incesante al azar de las moléculas gaseosas? El movimiento *imperceptible* de estas pequeñas partículas no puede verse pero puede observarse, incluso con un microscopio óptico el tosco movimiento de las partículas *coloidales* de mucho mayor tamaño suspendidas en líquidos o gases y presumiblemente impulsadas por las mismas moléculas.

El *movimiento* denominado *browniano* fue descubierto en 1827 por el botánico inglés Robert Brown, que examinó con un microscopio común una suspensión de minúsculos esporos de plantas dispersos en el agua y halló que se desplazaban en todos sentidos. La fig. 1-5 (A) ilustra un aparato para observar el movimiento browniano el cual está lleno de humo, y en la fig. 1-5 (B) se observa el curso irregular realizado por partículas de humo que varían en cuanto a su diámetro desde 500 a 10.000 Å. Obsérvese que el microscopio se dirige directamente al interior de la célula llena de humo, sin que la luz directa llegue al observador. En realidad, la luz llega al ojo debido a la reflexión dispersa producida por las partículas de humo, de manera análoga a lo que ocurre con las partículas existentes en un rayo de sol.

Los recorridos en zig-zag realizados por estas partículas sugieren que en un gas deben ocurrir frecuentes colisiones moleculares. Cuando las moléculas se acercan, las débiles fuerzas de atracción existentes entre ellas son superadas por las fuerzas de repulsión que surgen de la interacción

de las "nubes" de electrones cargados en forma negativa (fig. 1-6) que rodean al núcleo de átomos de gas. Como resultado, a una distancia de aproximadamente 3 Å, las moléculas de gas se repelen entre sí y cambian bruscamente de dirección. Los cálculos demuestran que a 0°C y a una presión atmosférica normal, cada molécula de aire recorre un promedio de aproximadamente 6,5 millonésimos de cm antes de chocar con otra molécula. Esta distancia promedio de recorrido entre dos colisiones sucesivas, también conocida como *recorrido medio libre*, llega a la fantástica cifra de aproximadamente un 1.600.000 km con el más alto vacío alcanzable.

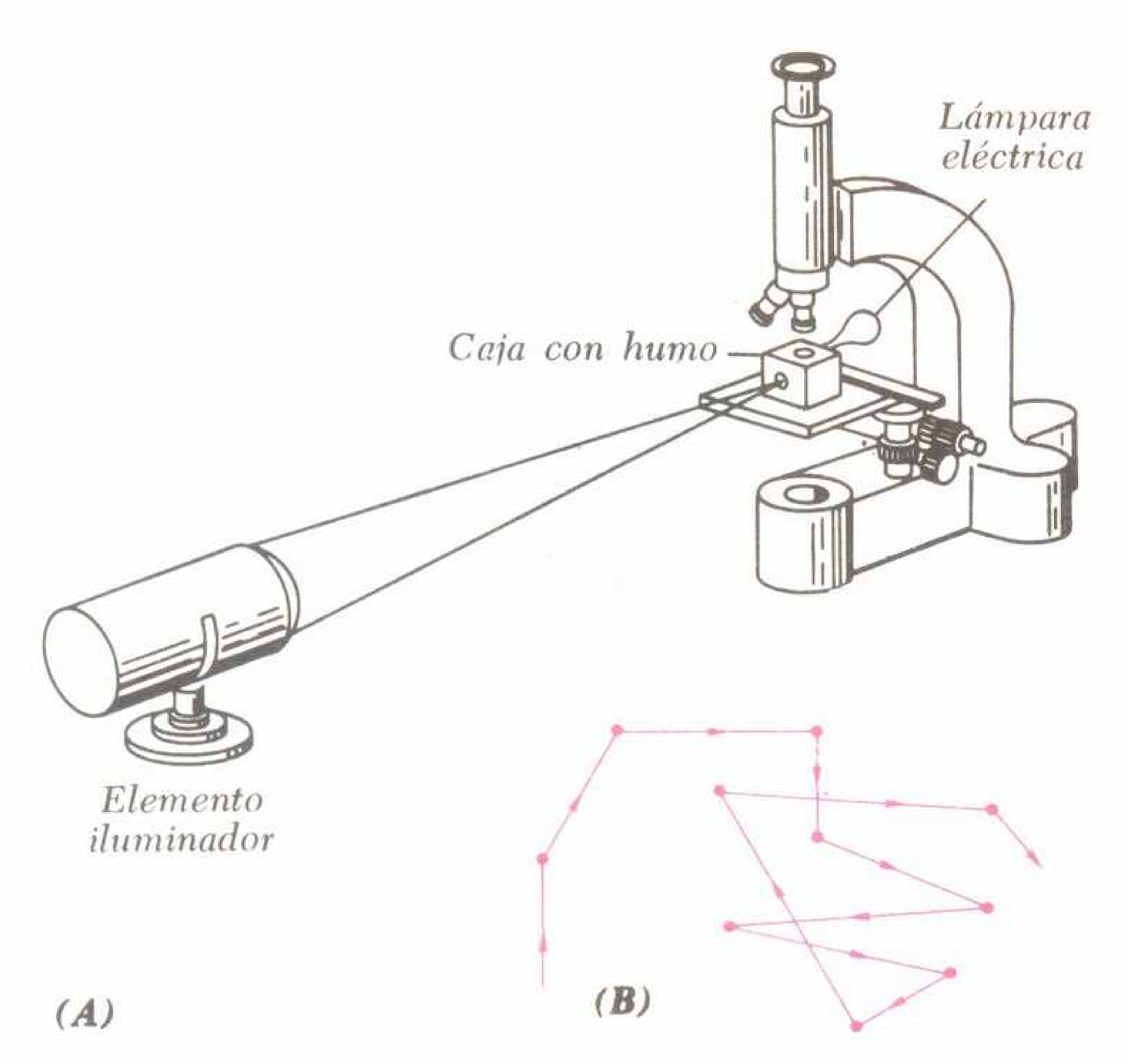


Fig. 1-5. (A) Aparato para el movimiento browniano, y (B) trayectoria en zig-zag seguida por una partícula de humo.

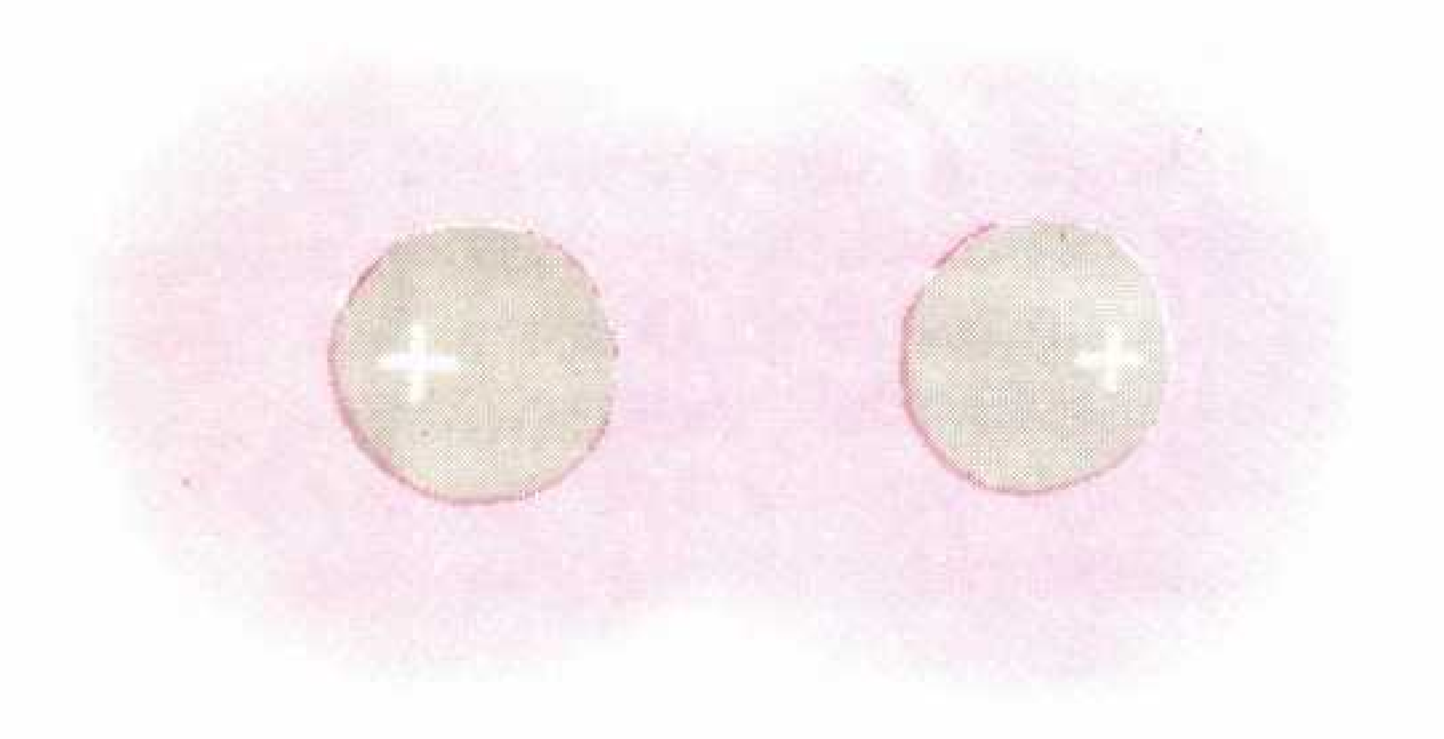


Fig. 1-6. Nubes de electrones que rodean a dos átomos de hidrógeno vecinos. Los electrones son compartidos por los dos núcleos positivamente cargados.

3 TEORIA CINETICA-MOLECULAR DE LOS GASES

Las primeras especulaciones respecto a los átomos se basaban en las configuraciones estacionarias o *estáticas* de estas partículas. El matemático y físico suizo Daniel Bernoulli fue el primero en atribuir la *presión* del gas (su empuje por unidad de superficie) al bombardeo incesante de las paredes del recipiente por las moléculas del gas, en rápido movimiento. El aspec-

to *cinético* de la estructura gaseosa fue más ampliamente desarrollado por Mayer, Joule y Clausius, que a fines del siglo XIX propusieron un sistema con firme base teórica para explicar el comportamiento de los gases.

La teoría *cinética-molecular* resultante se puede resumir de la siguiente manera:

1. Los gases estáán compuestos por partículas muy pequeñas (similares a un punto o sin dimensiones en los gases ideales). Estas partículas, denominadas *moléculas*, ocupan, bajo condiciones normales, un volumen aproximadamente mil veces más grande que el ocupado por las mismas en los estados sólido o líquido.

2. Las moléculas gaseosas se desplazan al azar, la cantidad promedio que se desplaza en una dirección cualquiera es igual a la cantidad promedio que se desplaza según cualquier otra dirección.

3. Las moléculas de gases diferentes tienen masas diferentes pero son aproximadamente del mismo diámetro.

4. Se puede admitir que las moléculas de un gas son perfectamente elásticas; por lo tanto, rebotan entre sí conservando tanto el momento (producto de la masa por la velocidad) como la energía cinética.

5. La velocidad del movimiento molecular se eleva con el aumento de temperatura.

6. El choque de las moléculas gaseosas contra las paredes del recipiente que las contiene explica la presión ejercida por el gas.

7. La teoría cinética proporciona las bases para las leyes de los gases de Boyle, Gay-Lussac y Charles.

4 DIFUSION Y ADSORCION DE LOS GASES

El movimiento al azar de las moléculas gaseosas hace que un gas se *difunda* o se disemine. (Los líquidos y los sólidos también se difunden, pero más lentamente). Estamos familiarizados con la propagación de los olores, pero no siempre nos percatamos que el aroma de las flores, del almizcle, del incienso, etc., sólo es posible por el desprendimiento y la migración de pequeñas partículas de los materiales odoríferos.

La fig. 1-7 (A) ilustra una botella de oxígeno y otra de hidrógeno colocadas boca a boca, estando colocada la botella de oxígeno en la parte superior. Una astilla encendida, colocada entre las botellas (después de unos instantes, para permitir la difusión), produce una leve explosión,

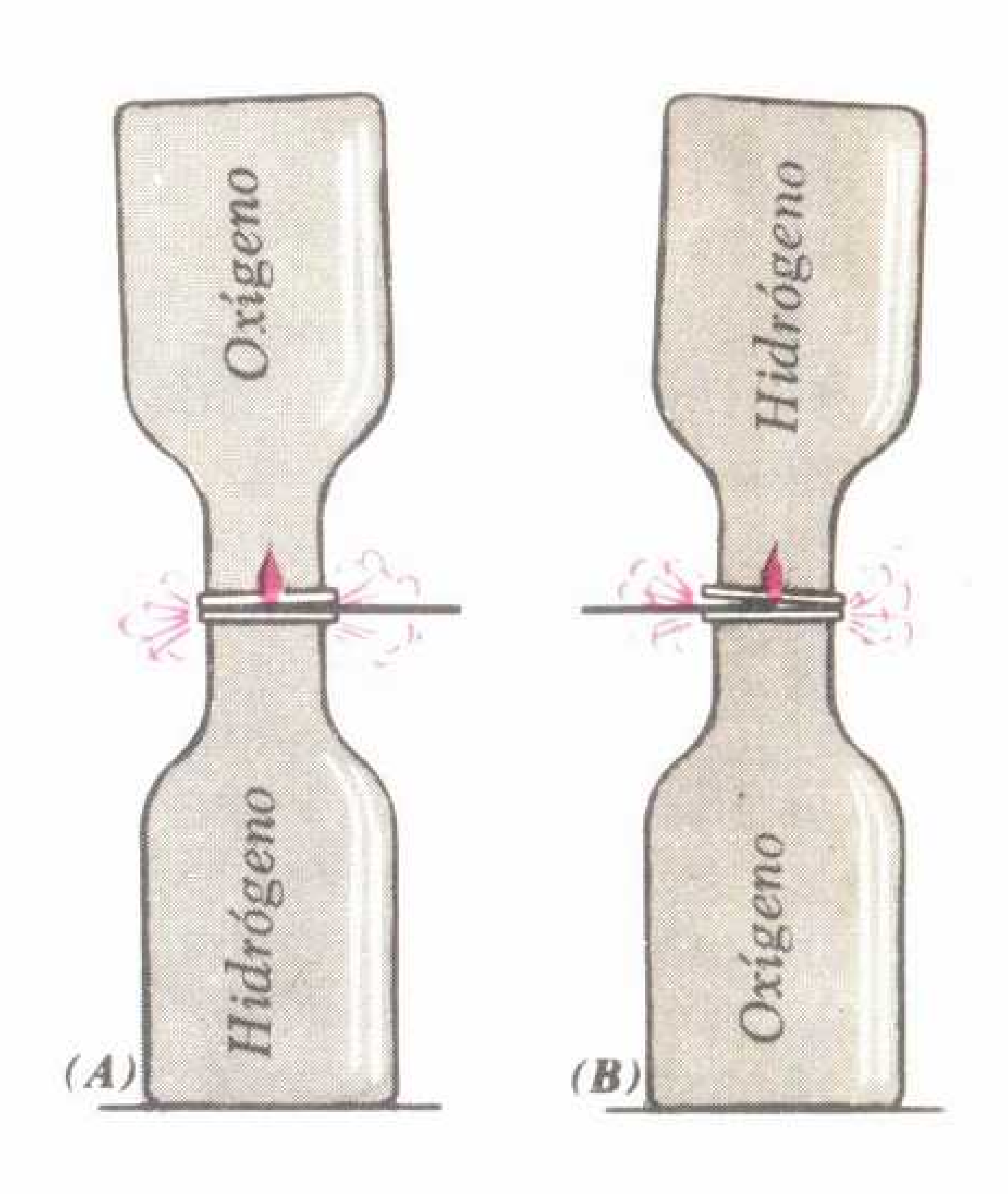


Fig. 1-7. Difusión de gases.

comprobándose de esa manera que los gases se han mezclado. En la fig. 1-7 (B), invertimos las posiciones de las botellas llenas de gas, y nuevamente colocamos una astilla encendida entre las mismas. La explosión resultante comprueba que, *sin tener en cuenta la posición*, las molécullas gaseosas de una botella se entremezclan con las existentes en la otra.

La velocidad de difusión de un gas a

través de pequeñas aberturas existentes en una barrera porosa (en base a un proceso también denominado *efusión*), varía en forma inversa con la raíz cuadrada de

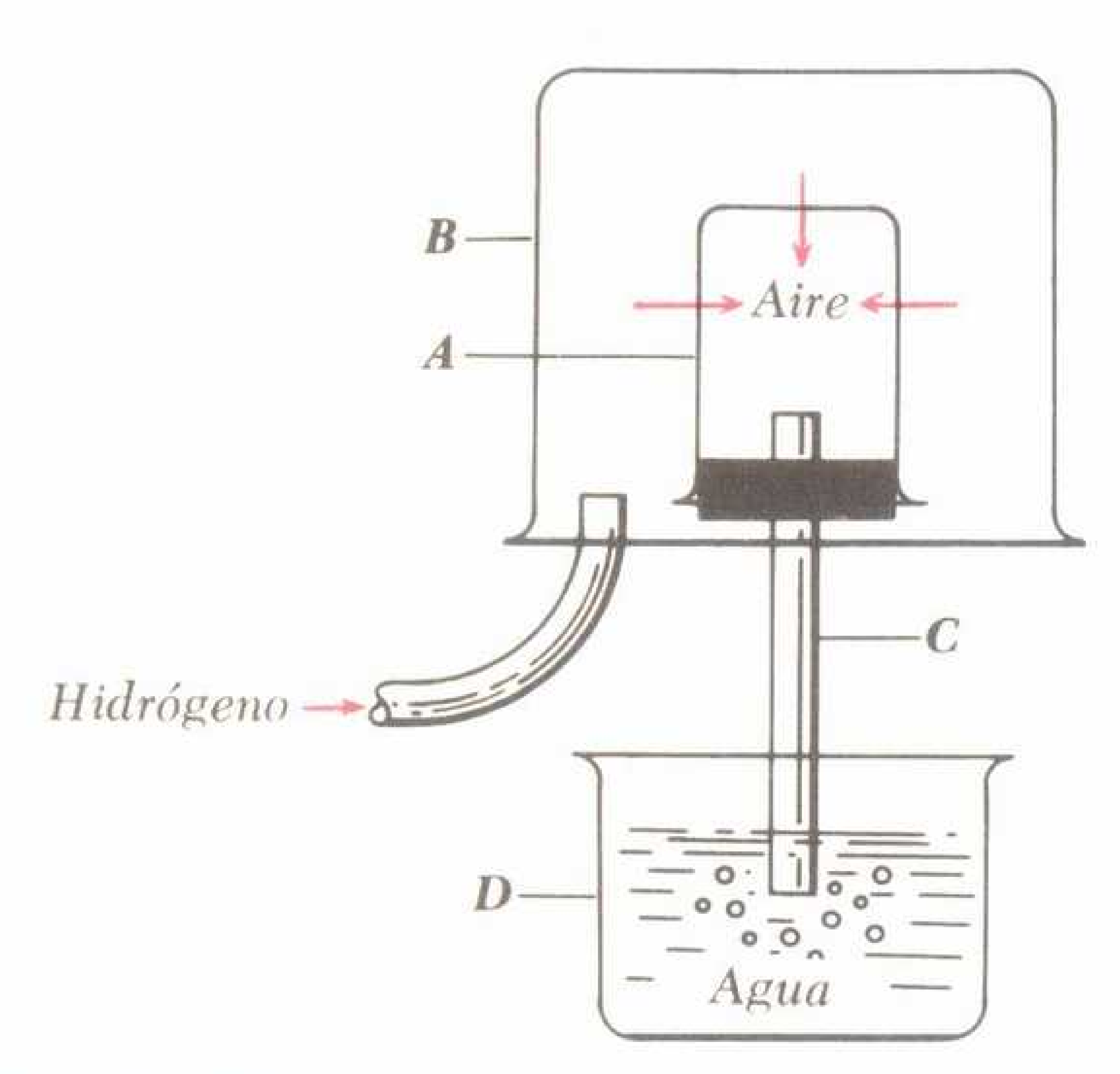


Fig. 1-8. Difusión relativa del hidrógeno y el aire.

su densidad. Lo que se conoce como *ley de Graham*. Simplemente, afirma que los gases livianos escapan a través de pequeñas aberturas en forma más rápida que los gases pesados. (¿Puede Ud. deducir esto a partir de la teoría cinética de los gases?) La figura 1-8 representa un recipiente de arcilla porosa (*A*) que contiene aire, sobre el cual se ha colocado en forma invertida un vaso de boca ancha que contiene hidrógeno (*B*). El recipiente de arcilla está provisto con un tapón firmemente ajustado con un orificio único a través del cual pasa un tubo de vidrio (*C*). El tubo se introduce por debajo de la superficie del agua existente en el recipiente (*D*).

El hidrógeno, menos denso que el aire, se difunde en el recipiente poroso a mayor velocidad que el aire se difunde *hacia el exterior* a fin de pasar al vaso de boca ancha. Como resultado, la presión del gas acumulado en el recipiente (*A*) aumenta, y en el recipiente (*D*) se forman burbujas. Esta difusión *diferencial* o desigual se utiliza en la separación de ciertos *isótopos* gaseosos (hexafluoruros de uranio), en un proceso necesario para la producción del combustible gaseoso. U-235. Estos gases son químicamente idénticos y difieren sólo en cuanto a densidad. Debido a que las diferencias de densidades son pequeñas, se requieren varios pasos sucesivos a través de barreras porosas a fin de producir una separación eficaz. En el Capítulo 2 hablaremos más al respecto.

Ciertos sólidos finamente divididos, con una gran relación de *superficie a volumen*, *adsorben* o *condensan* grandes volúmenes de gas sobre sus amplias superficies. Se estima que un gramo de carbón vegetal o animal finamente pulverizado tiene un área superficial de aproximadamente 10.000.000 cm^2. Por lo tanto, el carbón para máscaras antigás, obtenido calentando cáscaras de coco en cantidad limitada de aire, es capaz de adsorber un volumen de gases venenosos varias veces superior al suyo propio. Otros excelentes adsorbentes de gases son el gel de sílice, la tierra de diatomeas y la magnesita. El platino y el paladio especialmente tratados son capaces de adsorber grandes cantidades de hidrógeno e hidrocarburos gaseosos. El carbón vegetal enfriado en aire líquido se utiliza para eliminar casi totalmente los vestigios de gas que han quedado luego de haberse efectuado un vacío convencional.

5 ESTRUCTURA DE LOS LIQUIDOS

Los líquidos poseen propiedades intermedias entre las de los gases y los sólidos. Si bien su movimiento es mucho menor que el de las moléculas gaseosas, las moléculas de los líquidos están aun lejos de adoptar una posición tan rígidamente "fija" como los átomos de los sólidos. La estructura de un líquido puede representarse en forma aproximada por un modelo consistente en *una esfera y un resorte* (fig. 1-9) o un modelo *que llena el espacio* (fig. 1-10).

Los líquidos presentan un orden aproximado de *ordenamiento corto* pero carecen de la característica total del modelo de *ordenamiento largo* de los sólidos ver-

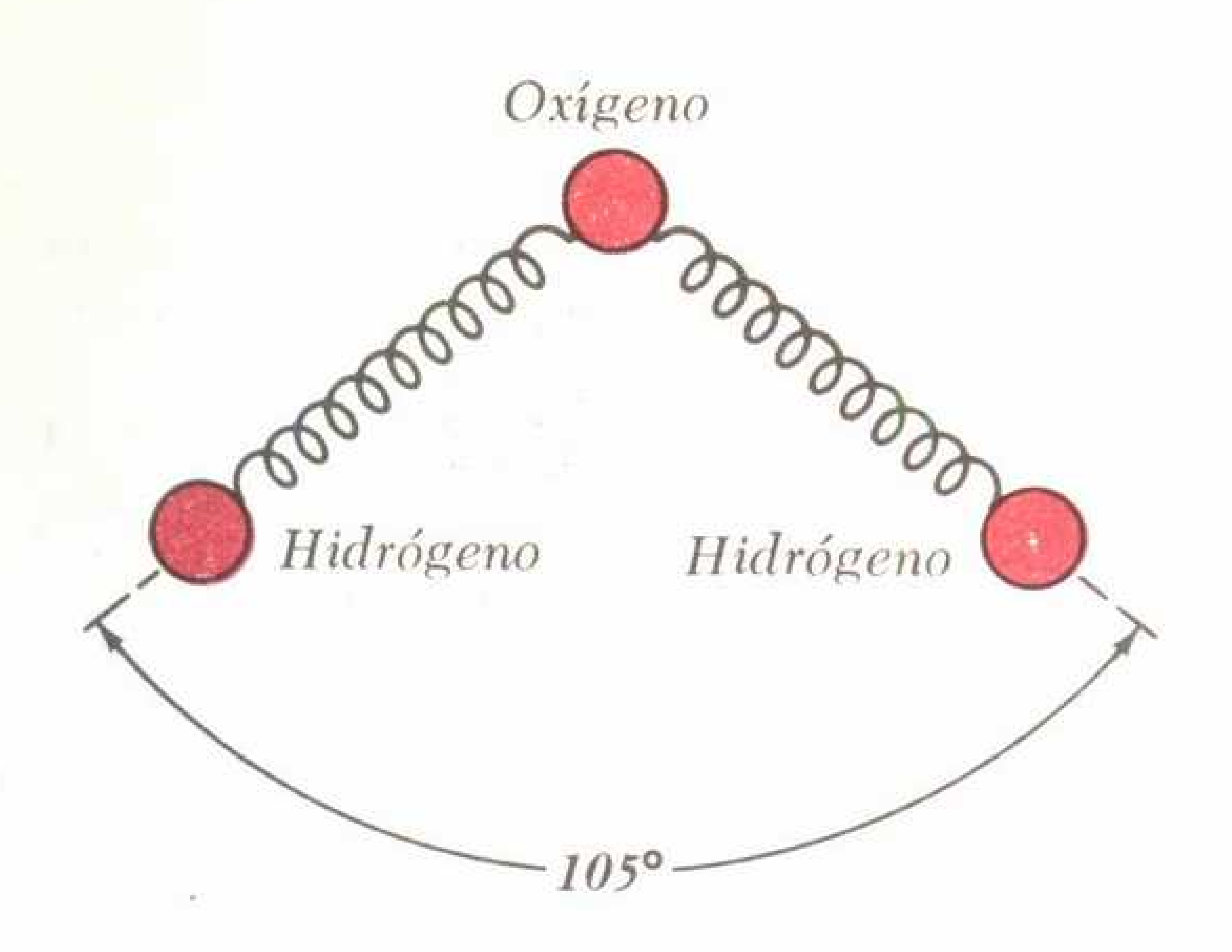


Fig. 1-9. Modelo de esferas y resorte de una molécula de agua.

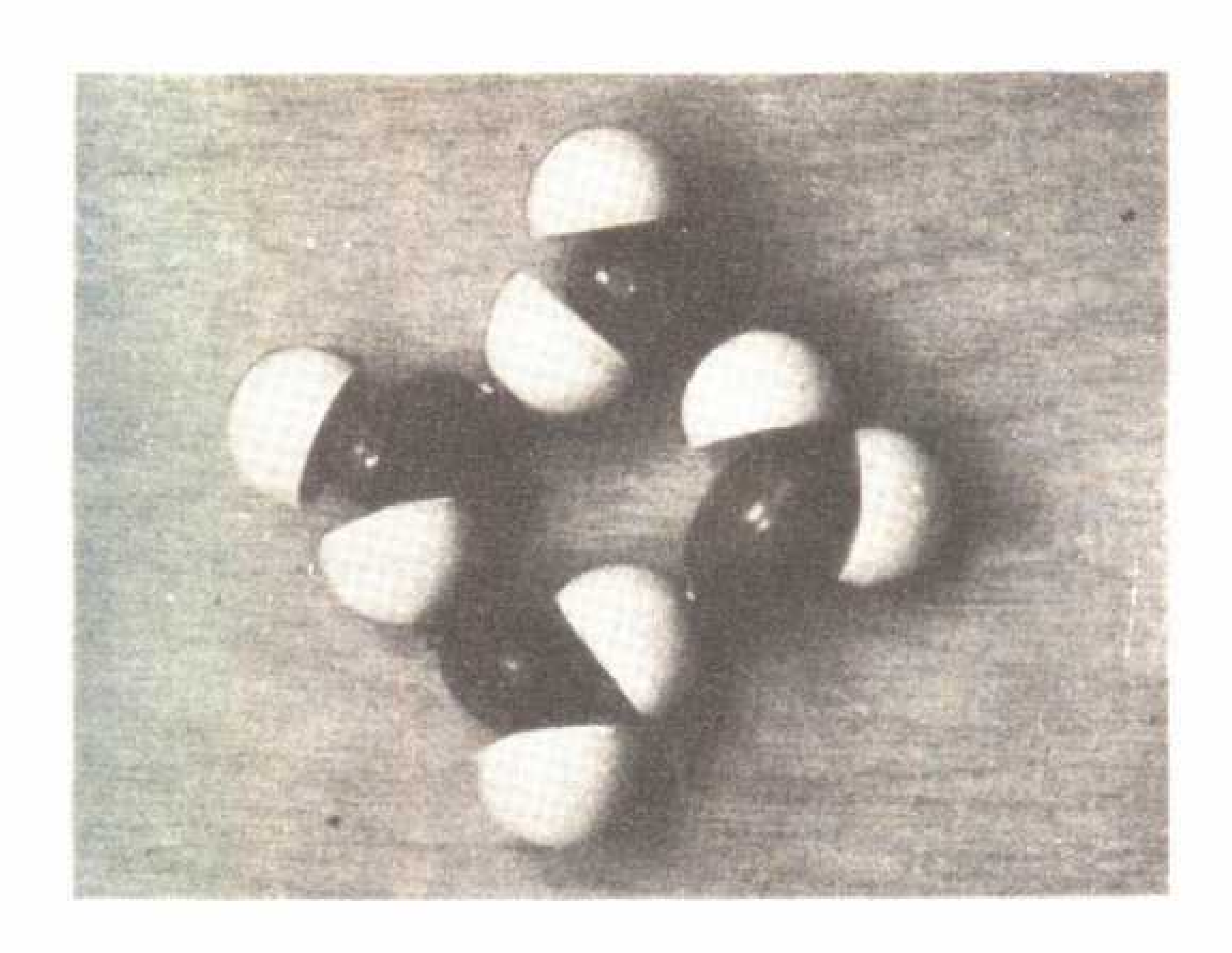


Fig. 1-10. Modelo que representa el espacio ocupado por cuatro moléculas de agua.

daderos. En el modelo más moderno en forma de *tetraedro* de una molécula (fig. 1-11), dos vértices de la pirámide están ocupados por átomos de hidrógenos y los otros dos por pares de electrones. Estas pirámides pueden agruparse por si mismas según una figura definida de ordenamiento corto, pero la existencia de una serie de lugares vacantes o desocupados de la red existentes a lo largo de todo el volumen del líquido posibilita el desplazamiento de las moléculas de un sitio a otro. El "cambio de compañero" resultante se debe a la *movilidad* o *difusibilidad* de los líquidos (fig. 1-12). La distancia intermolecular promedio en los líquidos es aproximadamente igual al diámetro de las moléculas propiamente dichas, o sea aproximadamente 3,5 Å.

Los líquidos no tiene forma propia pero presentan un volumen o masa definido, sujetos sólo a una leve reducción bajo presiones extremadamente altas. Las velocidades de expansión térmica de los líquidos superan a las de los solidos pero están por debajo de las de los gases. A diferencia de éstos, líquidos diferentes no siempre se mezclan bien entre sí.

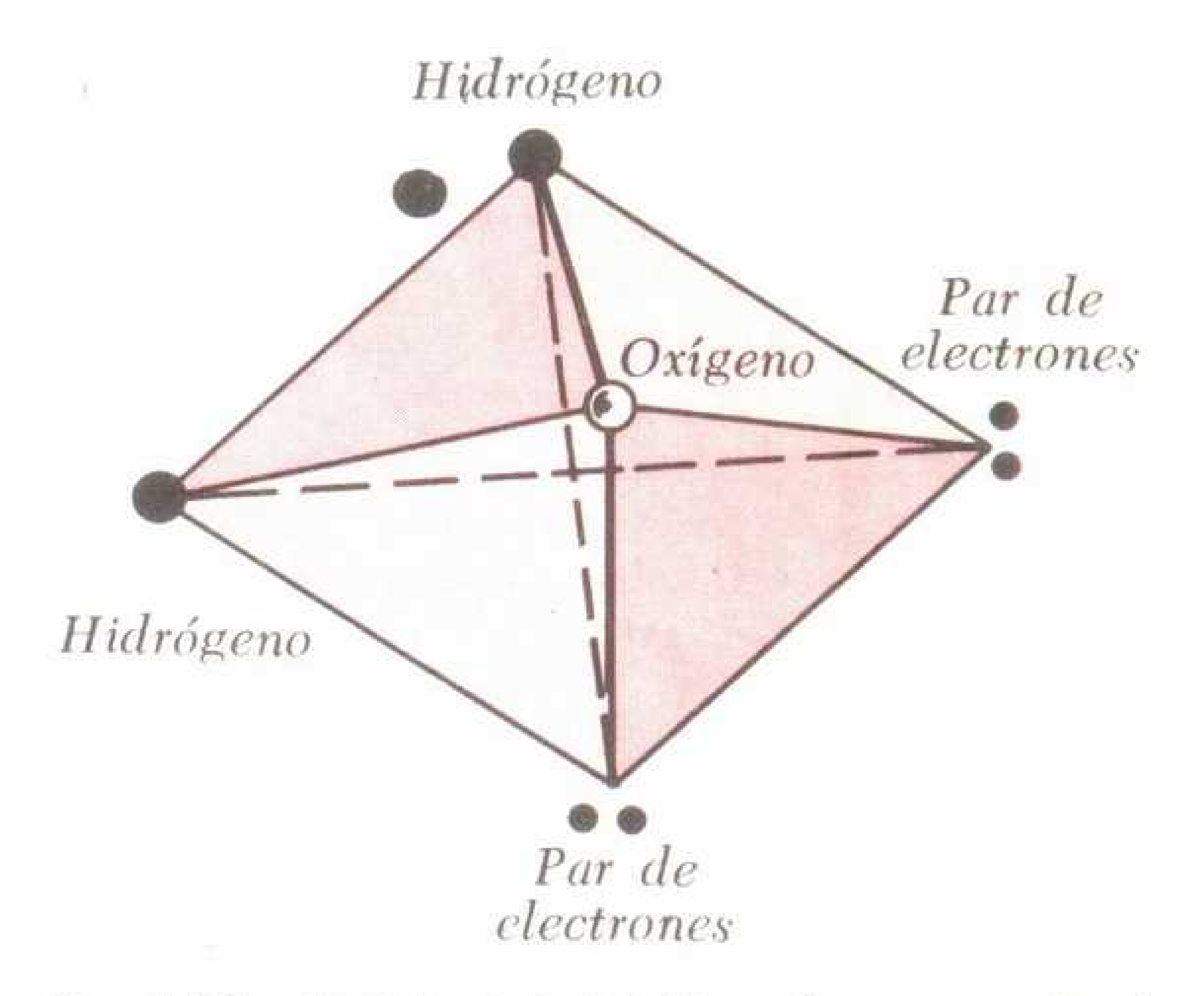


Fig. 1-11. Modelo tetrahédrico de una molécula de agua.

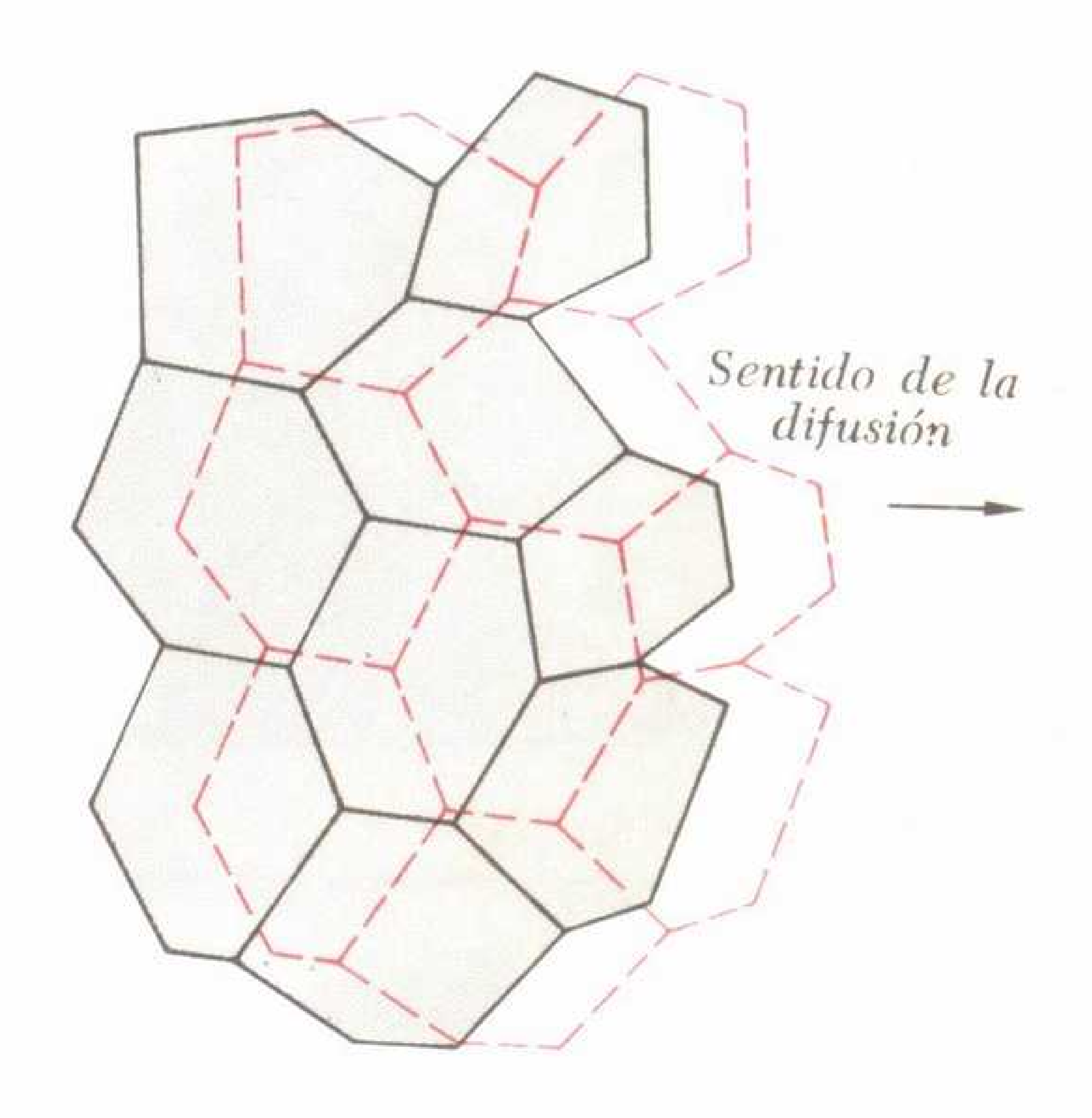


Fig. 1-12. Modelo de ordenamiento corto en un líquido. El diagrama ilustra una desviación en el modelo y la consiguiente difusión de las moléculas.

Los líquidos presentan diversos grados de *cohesión molecular* (atracción de moléculas iguales), así como diferentes capacidades para adherirse a la superficie de los sólidos o humedecer a las mismas (*adhesión molecular*). La adhesión de las moléculas de agua al vidrio limpio es más fuerte que la cohesión existente entre ellas. Como resultado, el *menisco* (curva de contacto) del agua en un recipiente de vidrio es *cóncavo* (fig. 1-13 A). En cambio, en las moléculas de mercurio existe una mayor adhesión entre las mismas que entre éstas y el vidrio. En consecuencia, el menisco con el vidrio es *convexo* (fig. 1-13 B). El aceite lubricante debe tener "cuerpo" suficiente como para mantenerse unido por cohesión y ser capaz además de unirse a las superficies metálicas por adherencia, protegiéndolas así del desgaste excesivo. Las variaciones de temperatura modifican el equilibrio existente entre las fuerzas de cohesión y adherencia y requieren cambios según las estaciones del año en los aceites para motores de automóviles. Por ejemplo, en tiempo frío aumenta la cohesión molecular del aceite con una consiguiente disminución en su capacidad humectante o lubricante. Como resultado, para uso invernal se prescriben aceites y grasas *más livianas*.

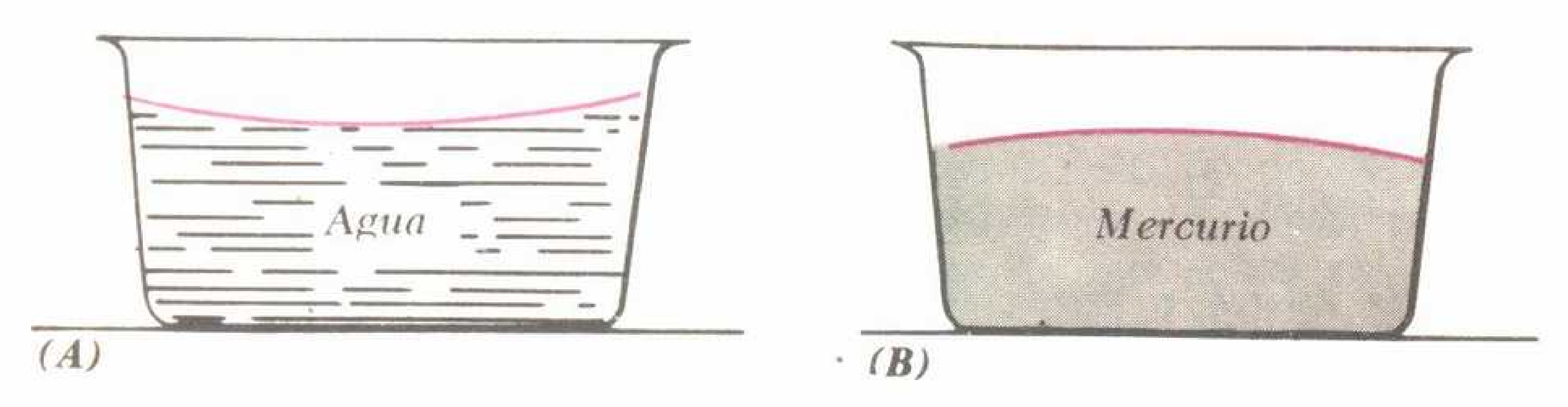


Fig. 1-13. Meniscos del agua y del mercurio en fuentes de vidrio (efecto exagerado).

6 TENSION SUPERFICIAL O ENERGIA SUPERFICIAL

La superficie libre de un líquido es quizás su característica más interesante. Debajo de la superficie, las moléculas se atraen entre sí en todos sentidos (fig. 1-14 A). En la superficie la atracción es sólo lateral y hacia el interior (fig. 1-14 B). Como resultado, las moléculas de la superficie son atraídas en conjunto y toda la superficie asume el carácter de una membrana elástica.

El punto de vista moderno sustituye el concepto de *energía* superficial por la noción algo más limitada (si bien todavía útil) de *tensión superficial*. La creación de una superficie líquida nueva, tal como la producida, por ejemplo, por el movimiento hacia la derecha del alambre transversal ilustrado en la fig. 1-15, requiere la realización de un trabajo y origina el almacenamiento de energía en forma potencial. Esto es análogo al trabajo gastado y a la energía potencial acumulada cuando se estira una lámina de goma. Debido a que en cualquier sistema físico la cantidad de energía potencial o almacenada *tiende a un valor mínimo,* la superficie de un líquido abandonada a sí misma, tiende a *contraerse* mas bien que a dilatarse.

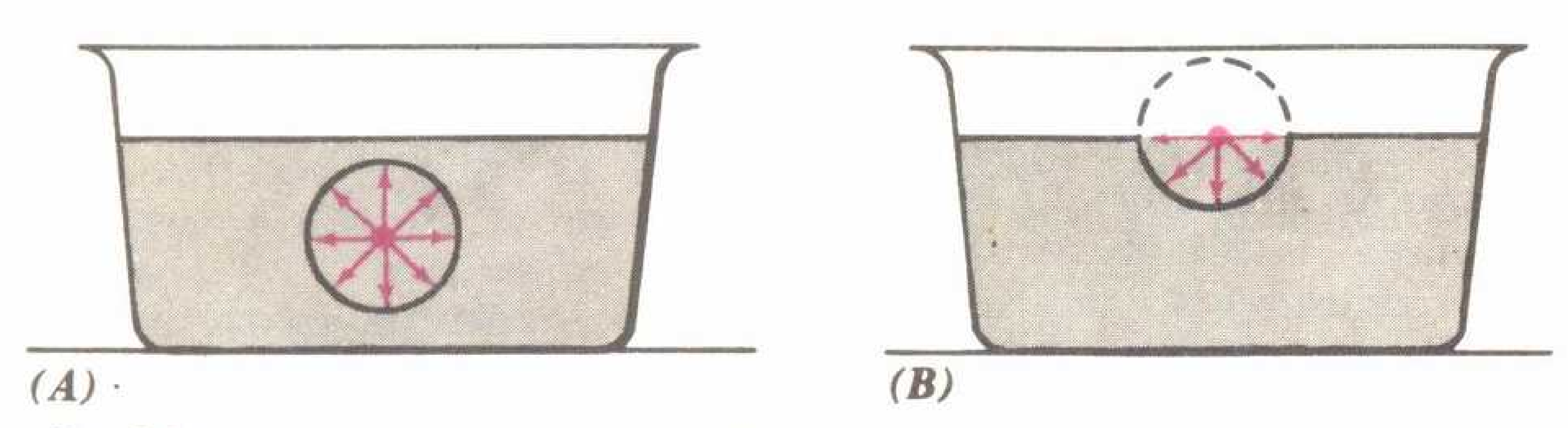


Fig. 1-14. Fuerzas moleculares: (A) debajo, y (B) en la superficie de un líquido.

Como ejemplo de la conducta similar a una lámina de goma que poseen las películas superficiales, consideremos ahora el comportamiento de las gotas de mercurio depositadas sobre una plancha de vidrio limpia, o de las gotas de agua desparramadas sobre una plancha de vidrio oleosa o grasa. Estas gotas adquieren forma esférica debido a que la superficie esférica es la más pequeña que puede encerrar un volumen dado. Las gotas más grandes adquieren aspecto aplanado debido al efecto de la gravedad. Obsérvese la forma de las gotas de agua esparcidas sobre un material que repele el agua (fig. 1-16). Al disminuir las fuerzas de adherencia, las de cohesión modelan cada gota, salvo las más grandes, según la forma esférica.

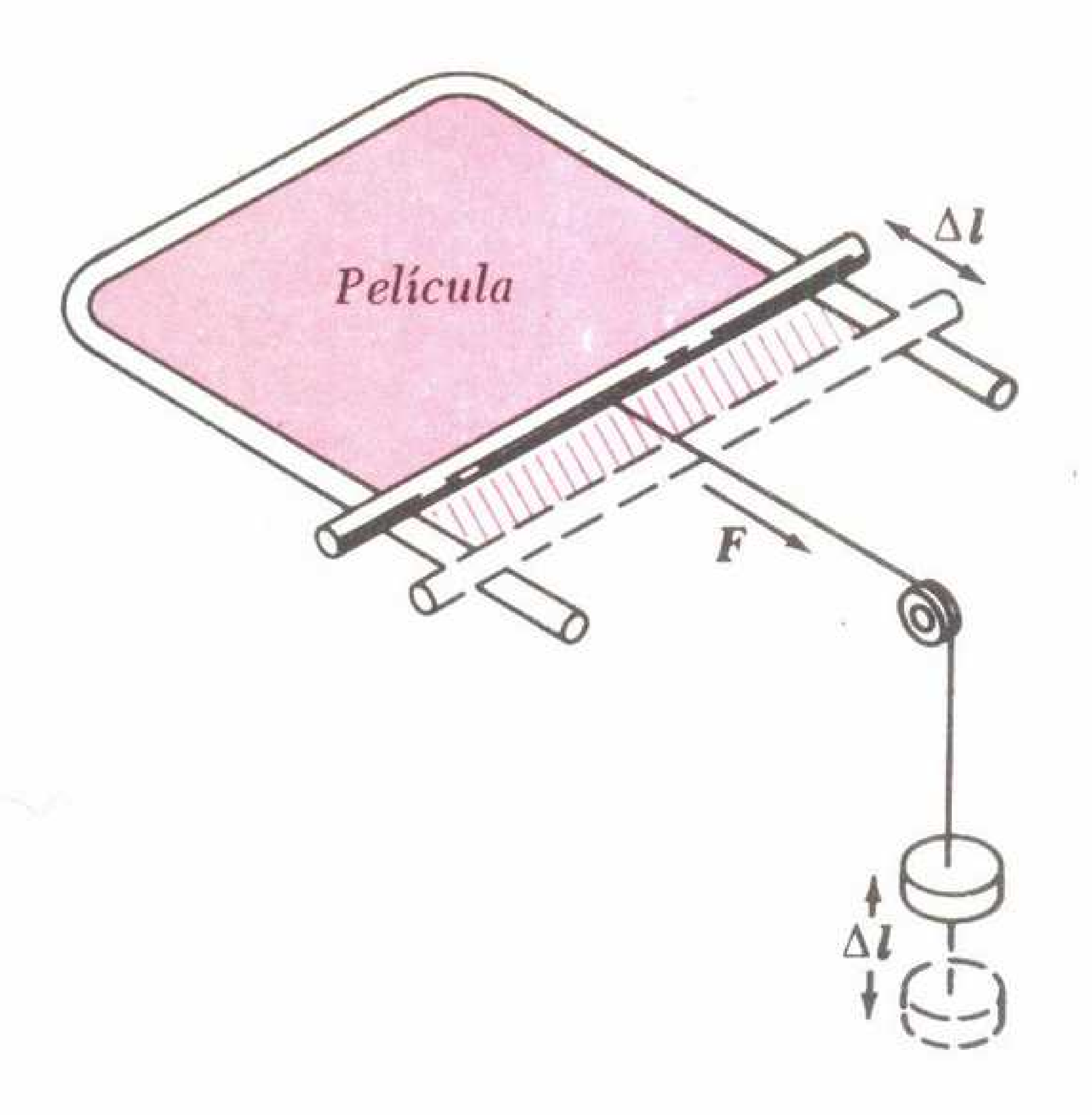


Fig. 1-15. La creación de una superficie extra (sombreada transversalmente) requiere la realización de un trabajo igual al producto de la fuerza F (acción del peso mediante la polea), y Δ L (distancia según la cual se desplaza la fuerza).

La tensión superficial disminuye con el aumento de la temperatura y también se reduce cuando se disuelven ciertas substancias en líquidos puros. Puede adherirse una pequeña porción de jabón a la popa de un pequeño bote de madera que luego se coloca en una bañera llena de agua. A medida que el jabón se disuelve, la tensión superficial del agua en la parte posterior del bote disminuye mientras que en la parte delantera permanece constante. Como resultado, el bote es impulsado hacia adelante. Se detiene tan pronto como la película jabonosa cubre a toda la superficie del agua.

Un *agente detergente* o *humectante* reduce todavía más la tensión superficial del agua. La fig. 1-17 ilustra dos madejas idénticas de lana, de igual peso, sumergidas una en agua pura (parte *A*) y la otra en una solución de un detergente comercial (parte *B*). La tensión superficial del agua pura mantiene erguida a la primer madeja durante un lapso considerable debido a que permite atrapar aire entre las fibras de lana. La tensión superficial más reducida de la solución detergente deja escapar aire y la segunda madeja, flotando menos se hunde rápidamente.

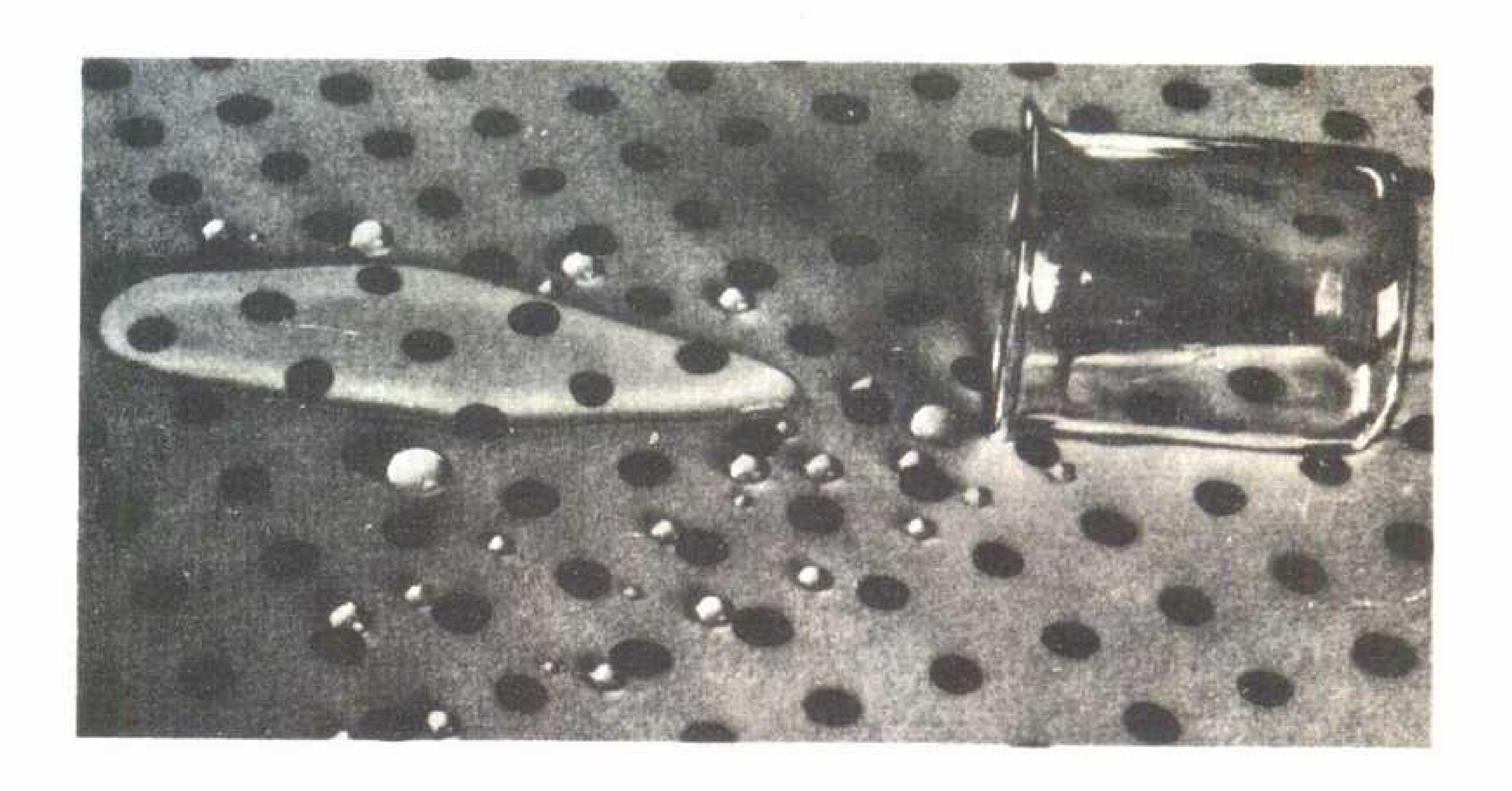
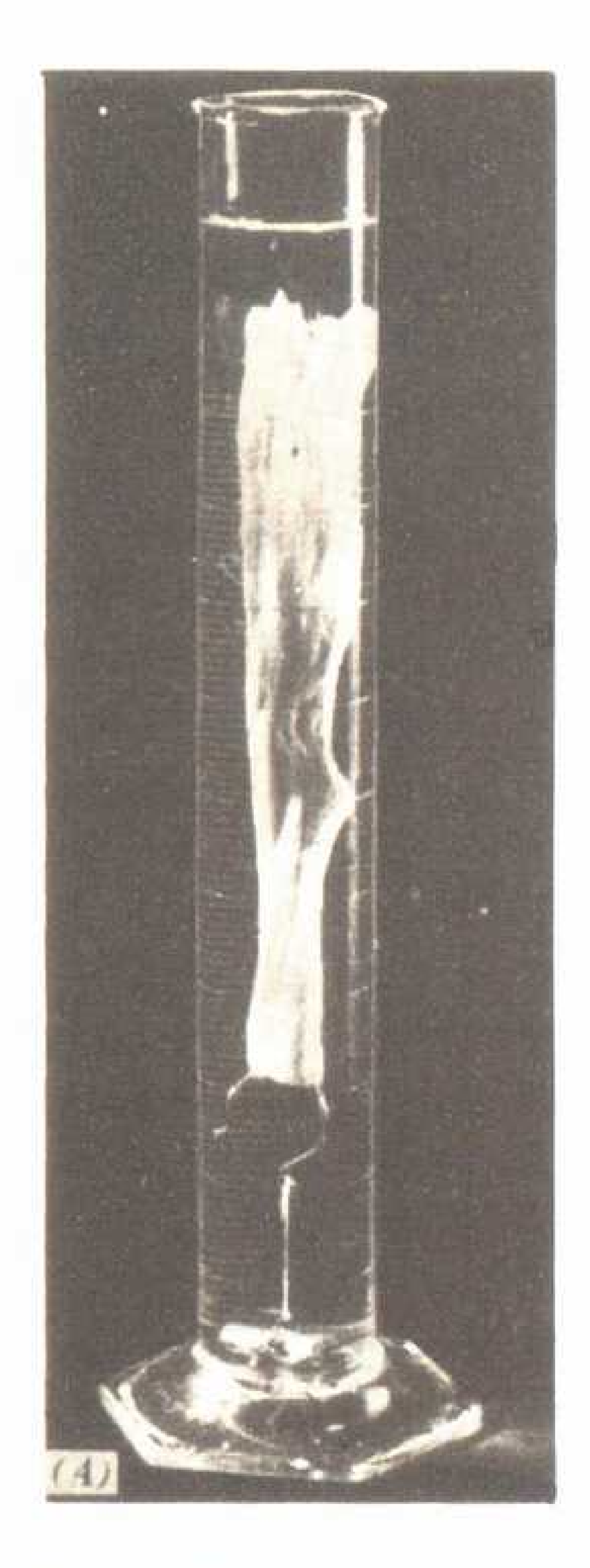


Fig. 1-16. Gotas de agua esparcidas sobre una tela que repele el agua.



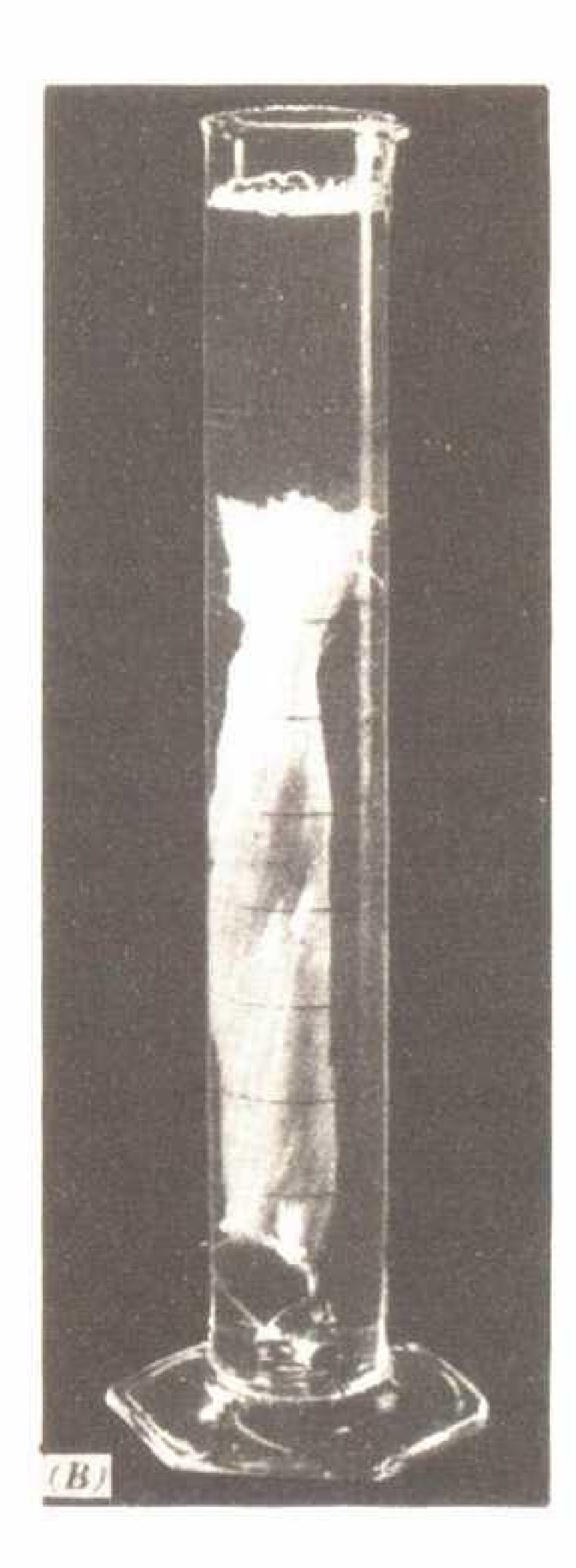


Fig. 1-17. (A) Madeja de lana en el agua. (B) Madeja de lana en una solución detergente.

7 VISCOSIDAD DE LOS LIQUIDOS

Se puede considerar a la viscosidad como la *fricción interna* que presenta un fluido sea líquido o gaseoso. Debido a la viscosidad, la resistencia se genera por el deslizamiento de una capa de fluido con respecto a otra. Normalmente, los líquidos son más viscosos que los gases.

La fig. 1-18 presenta un conjunto de tubos *de burbuja* para medir la viscosidad, o *viscosímetros.* Cuanto mayor es la viscosidad de un líquido, más lento es el ascenso de la burbuja de aire por el mismo. Los viscosímetros más elaborados permiten una medición cuidadosa de la velocidad de descarga de un líquido a través de una abertura angosta existen en la parte inferior de un recipiente metálico. Debido a que la viscosidad depende de la temperatura se toman medidas para mantener al líquido a cierta temperatura fija prescripta. Los nuevos lubricantes, conocidos como *aceites de siliconas*, poseen una viscosidad prácticamente constante dentro de una amplia gama de temperaturas.

Es interesante hacer notar en este aspectro la conducta excepcional del denominado *helio-II,* que forma parte del helio líquido obtenido a una temperatura de 2,2 grados Kelvin (absolutos). El helio-II que posee una viscosidad inferior a 0,0001 de la correspondiente al hidrógeno, fluye fácilmente a través de la bertura más angosta (fig. 1-19 A), o asciende por las paredes laterales del recipiente que lo contiene (fig. 1-19 B), y se derrama. Este fenómeno descubierto por primera vez por Peter Kapitz se denomina *super fluidez.*

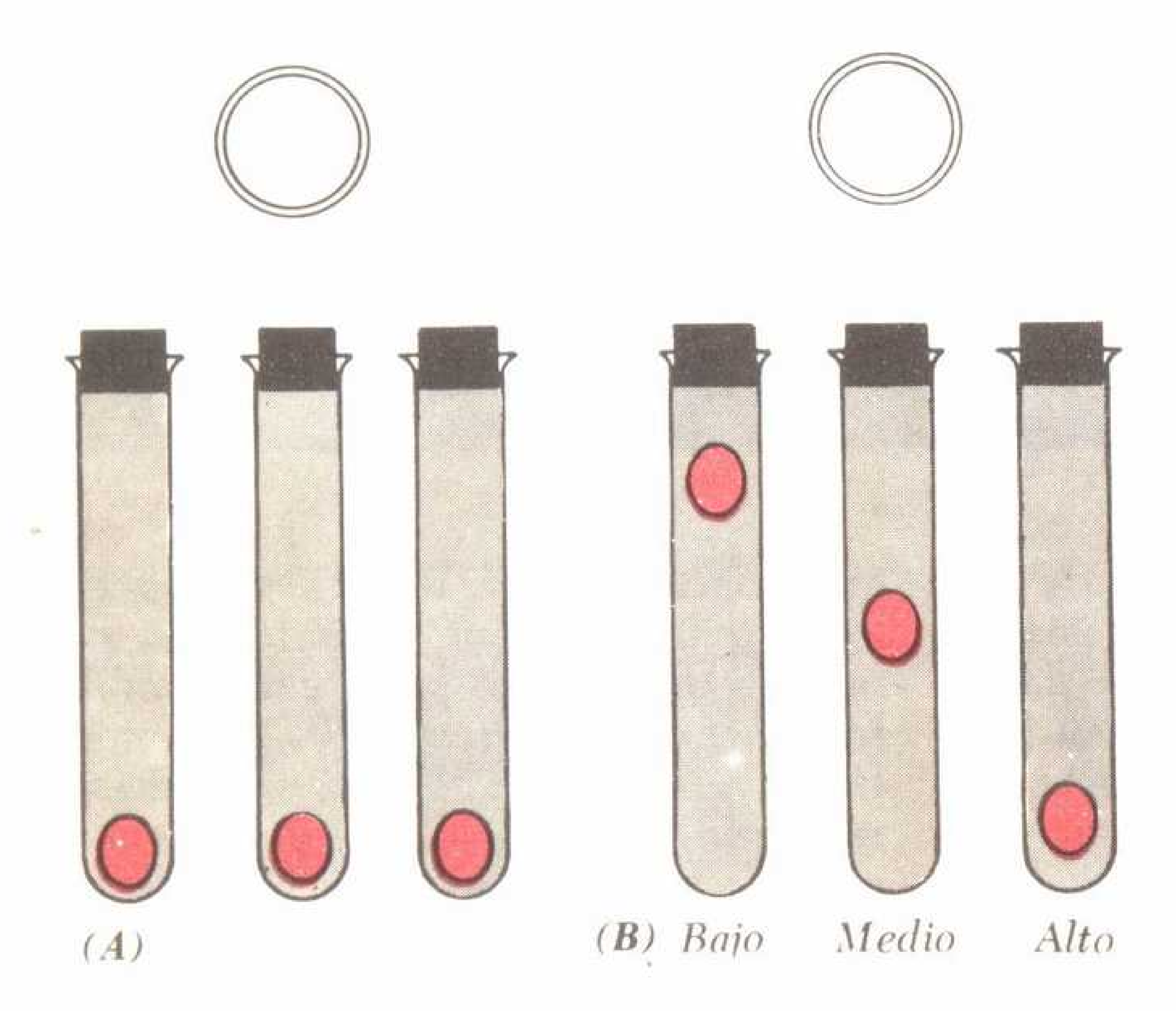
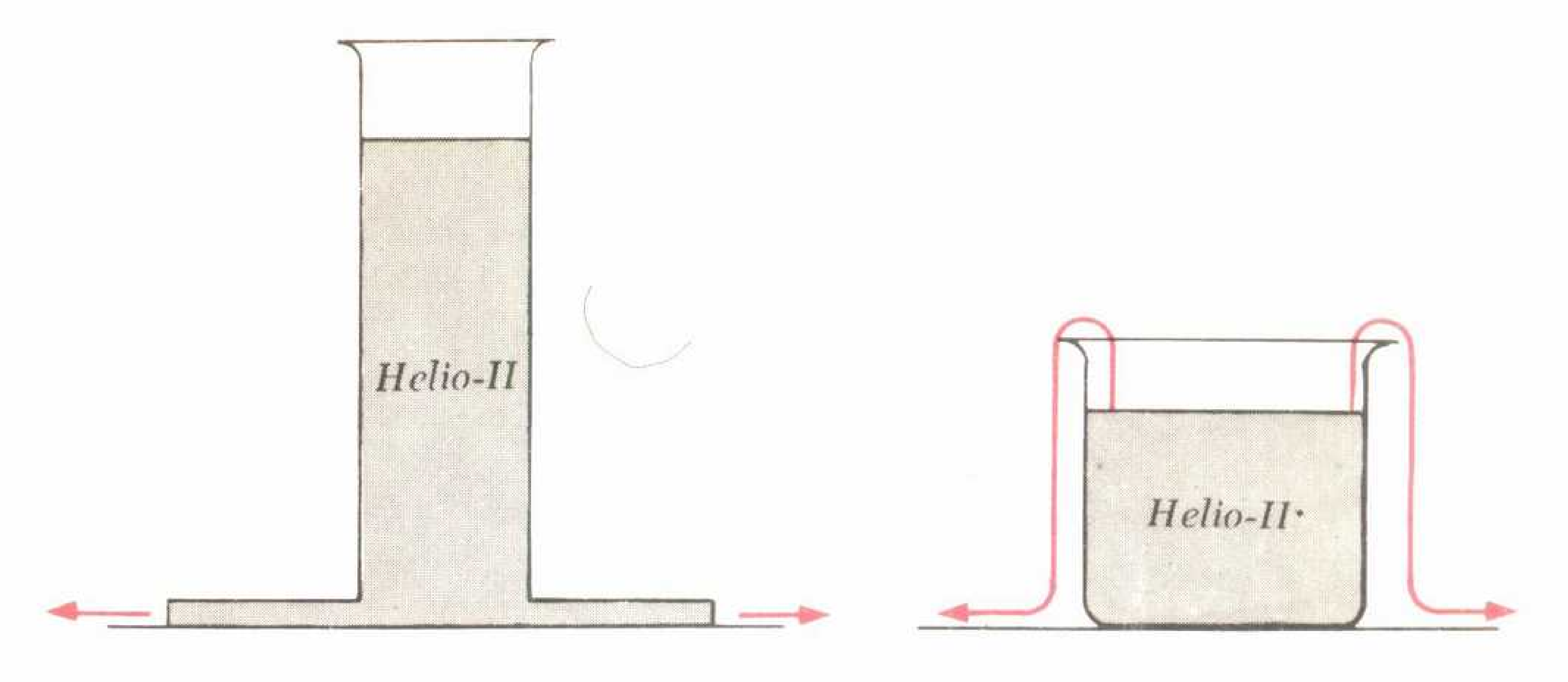


Fig. 1-18. Viscosímetros de burbuja que miden la viscosidad relativa de tres líquidos.



(A) *El líquido fluye rápidamente a través de una fina hendidura demasiado estrecha para permitir que el Helio (He-I) escape.*

(B) *El Helio-II sube por los costados del recipiente y desborda.*

Fig. 1-19. Comportamiento del helio-II — un superfluido.

8 ANATOMIA DE LOS SOLIDOS

Un sólido verdadero se caracteriza por una estructura cristalina relativamente rígida, formada a partir de un modelo de *células unitarias* que se repiten a intervalos regulares por todo el sólido (fig. 1-20). A diferencia de los gases, en los cuales las moléculas se desplazan al azar, o en un líquido, en el cual las agrupaciones moleculares presentan sólo un ordenamiento corto, los átomos de un sólido están *geométricamente orientados* respecto a ciertas posiciones fijas que sirven como centros para sus vibraciones limitadas. En los sólidos metálicos, las nubes de electrones (denominadas "gas electrónico") pululan entre átomos vecinos y ayudan a mantener unidos a los iones metálicos cargados en forma positiva. Debido a la presencia de estos electrones libres, *compartidos* por los átomos vecinos, los metales son buenos conductores eléctricos y térmicos.

Los cristales perfectos *únicos* ("bigotes" metálicos) presentan una resistencia sorprendente a la tracción. Por otra parte, los agregados cristalinos imperfectos se deforman fácilmente debido a la presencia de "dislocaciones" o "fallas" a lo largo de toda su estructura (fig. 1-21). Esto se explica debido al *flujo plástico* o formación progresiva de sólidos imperfectos.

La estructura de un sólido cristalino está íntimamente ligada a al forma y den-

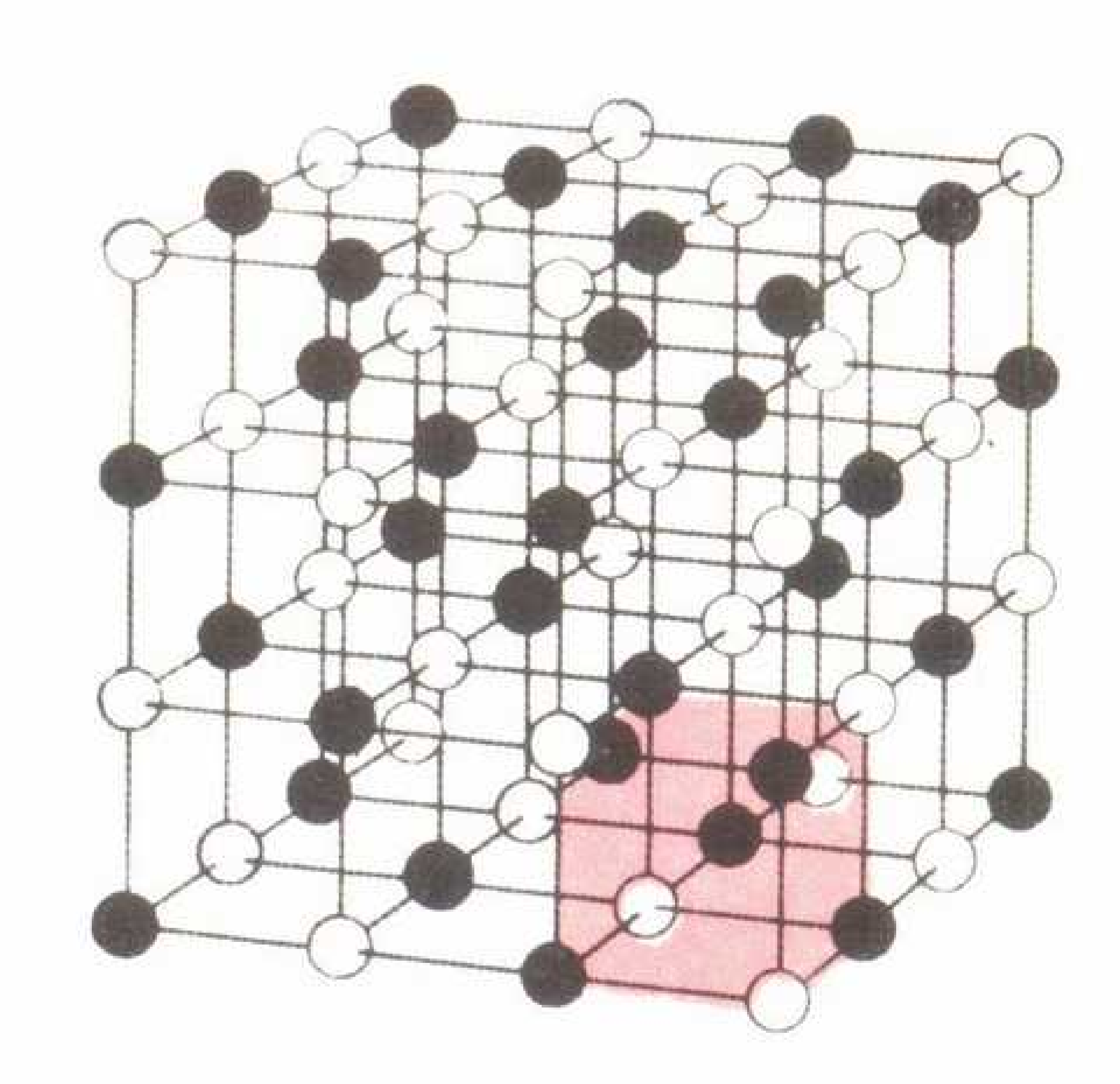


Fig. 1-20. Célula unidad (coloreada) en la estructura de la sal gema (ClNa). Las bolillas negras representan los iones sodio y las blancas los iones de cloro.

sidad del agrupamiento de sus átomos. En el sistema *cúbico simple* (fig. 1-22 A), característico de los *cristales iónicos*, tales como el cloruro de sodio, el bromuro de

sodio, el fluoruro de litio, el bromuro de litio, etc., en cada esquina de la celda unitaria se hallan átomos (o iones) con

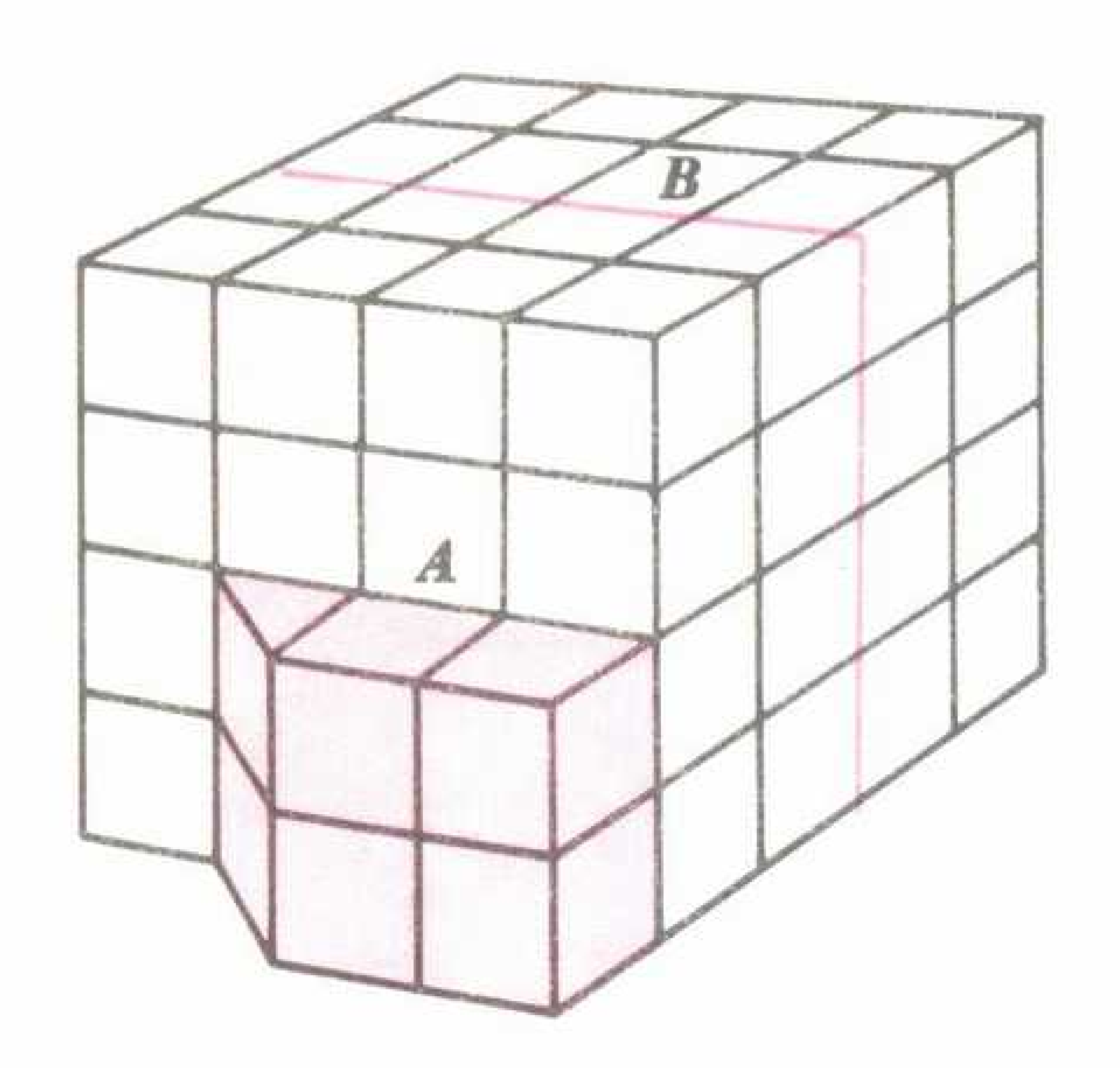
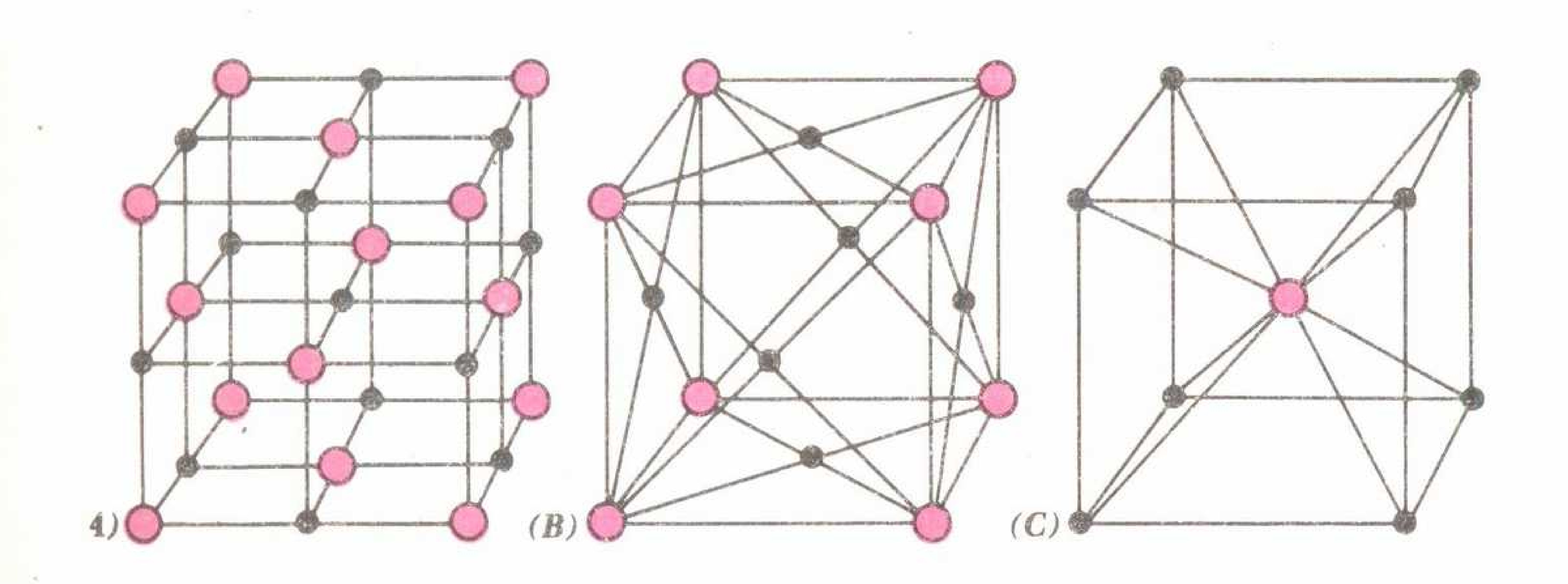


Fig. 1-21. Dislocaciones en un cristal imperfecto: (A) tipo rosca, (B) tipo borde.

cargas contrarias. La *estructura cúbica de cara centrada* (fig. 1-22 B) es otro ordenamiento simple en el cual los átomos ocupan el centro de cada cara así como también las esquinas del cubo. Esto posibilita que los átomos se sitúen muy cercanos entre sí y explica la alta densidad, maleabilidad y ductibilidad de metales como el cobre, la plata, el oro, el platino, el níquel, el plomo, etc. (Los modelos de estos metales tienden a tomar fácilmente de nuevo su forma después de una deformación). Aun otro ordenamiento es el de la *estructura cúbica de cuerpo centrado* en el cual, además de los ocho átomos que ocupan las esquinas de un cubo, existe un átomo adicional en el centro (fig. 1-22 C). El hierro, el tungsteno, el cromo y el molibdeno presentan este sistema de cristalización. Estos metales son fuertes y tenaces.

En la fig. 1-23 se ilustran modelos de diversos sólidos cristalinos. El segundo modelo contando desde la izquierda es el del cloruro de sodio o sal gema.

Ciertos minerales que se encuentran en forma natural, tales como el diamante (una forma del carbón) presentan una estructura totalmente cristalina que posteriormente es realzada al ser convenientemente cortados y pulidos. En la fig. 1-24



Cristal cúbico simple (iónico de cloruro de sodio. Los círculos pequeños representan iones sodio (Na+) y los círculos grandes iones cloro (Cl−)

Estructura cúbica de cara centrada

Estructura cúbica de cuerpo centrado

Fig. 1-22. Estructuras cristalinas típicas.

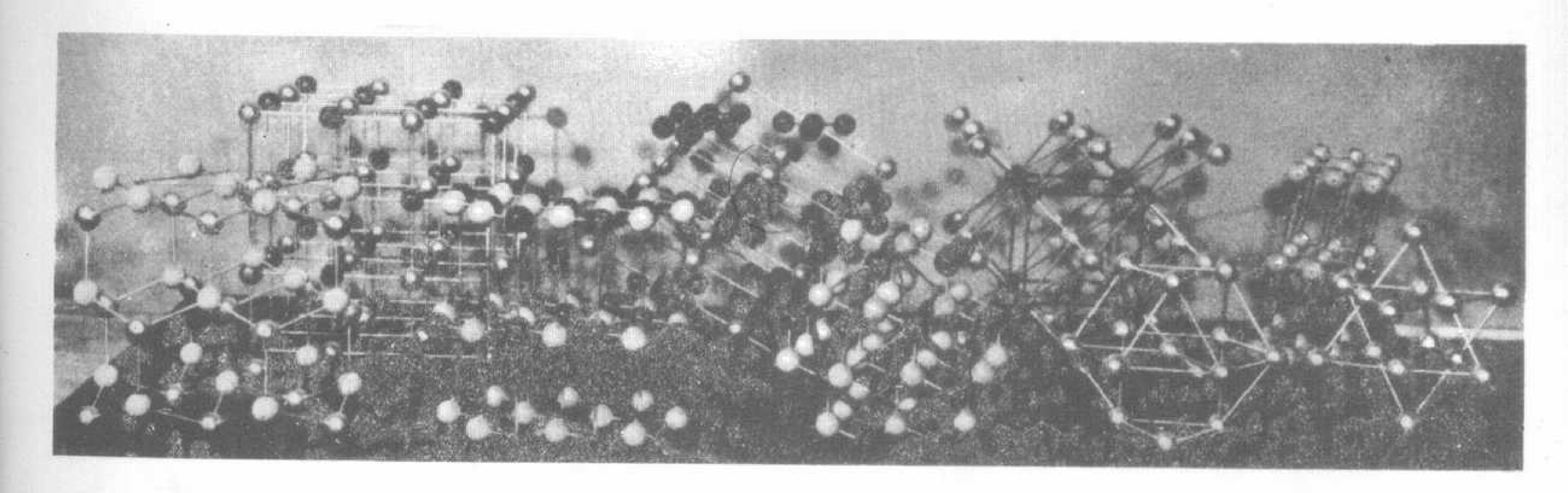


Fig. 1-23. Modelos de sólidos cristalinos.

se ve un modelo espacial (tridimensional) de un cristal de diamante. Los diamantes grandes perfectos tales como el famoso Cullinan (cuyo peso originario era de 3.106 quilates), son cuidadosamente partidos a lo largo de sus ejes cristalinos para obtener muestras perfectas más pequeñas. Recientemente, se han fabricado en forma artificial pequeños diamantes industriales (en contraposición a los que tienen la calidad de una gema)) sometiendo mezclas de carbono y catalizadores a una presión de 105.000 kg/cm^2 y a una temperatura de 2.760°C. La fig. 1-25 muestra un grupo de diamantes artificiales del tamaño de un quilate fotografiados, a título comparativo, con una escala de una pulgada de longitud (2,54 cm).

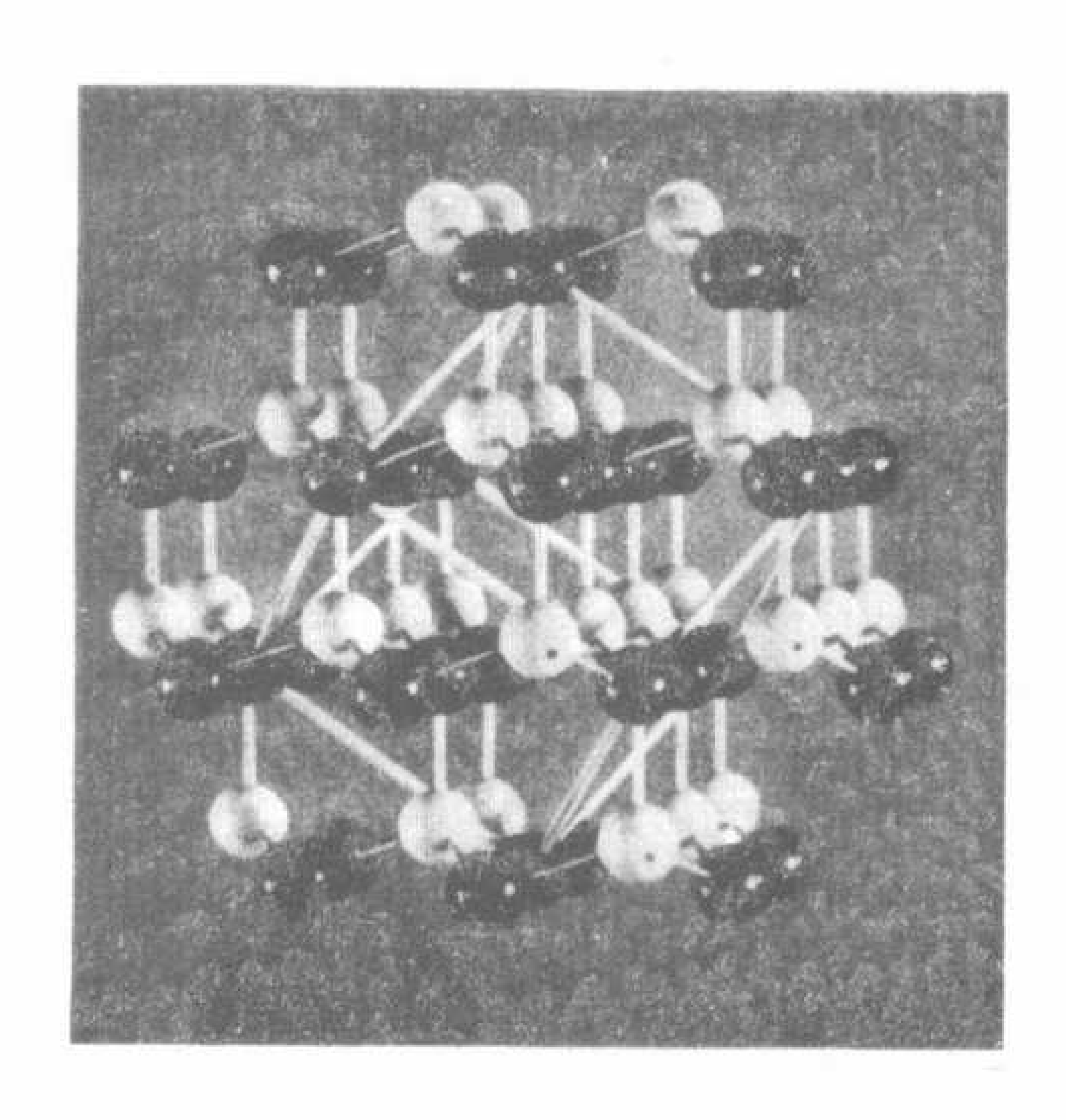


Fig. 1-24. Estructura cristalina del diamante.

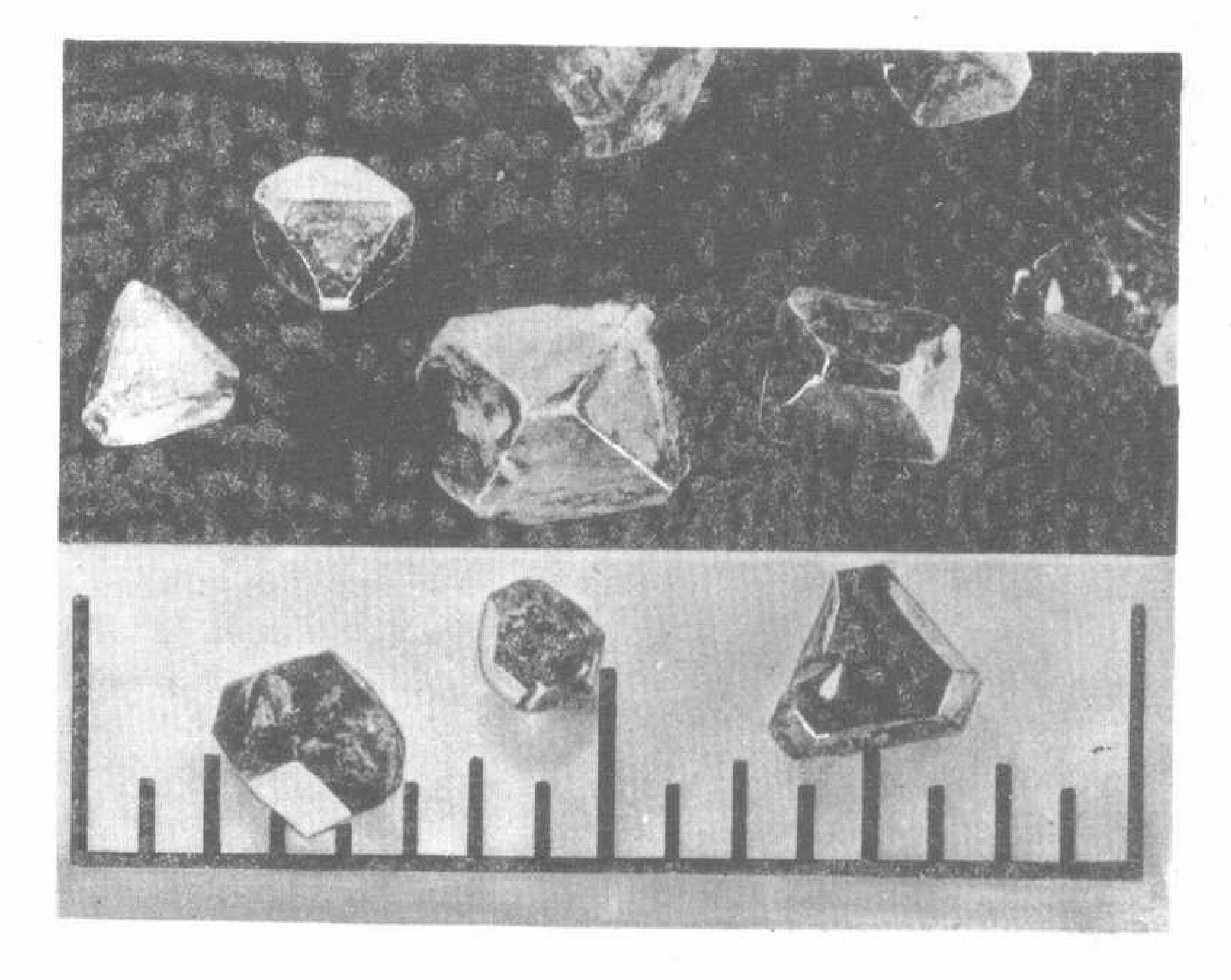


Fig. 1-25. Grupo de diamantes comparadas con una escala de 2,54 cm (1 pulgada). Estos diamantes aun no tienen resistencia mecánica suficiente para ser utilizados en forma industrial.

9 DUREZA, MALEABILIDAD Y DUCTILIDAD

La *dureza*, o resistencia al desgaste o abrasión, está directamente relacionada con la estabilidad de la estructura cristalina. Hasta 1957, el diamante era el cuerpo más duro conocido. Era el único capaz de rayar o mellar a cualquier otro. En ese año, en el Laboratorio de investigaciones de la General Electric se obtuvo el *nitruro de boro cúbico* (*Borazon*). El borazon se obtiene a una presión de aproximadamente 70.000 kg/cm^2 y a una temperatura de 1.649°C. Mediante ensayos de difracción por rayos X se observa que la estructura del borazon está compuesta por capas alternadas de boro y nitrógeno agrupadas conjuntamente según un modelo cúbico casi tan fuerte como el de los átomos de carbono en un diamnte. El resultado es que el diamante que hasta ese momento "no era capaz de ser rayado" puede ser rayado por el borazon y viceversa.

En orden de dureza sigue el *Carboloy*, aleación de carburos de tungsteno, tantalio y titanio, mezclados con un aglutinante de cobalto. Los *carburos cementados* mantienen el filo 50 veces más que el acero aun a al temperatura del rojo brillante. En la parte inferior de la escala de dureza se hallan la calcita, el yeso y el talco. El grafito, otra forma cristalina del carbono, es aun más blando que el talco y en consecuencia útil como lubricante. Inmediatamente surge la pregunta: "¿Cómo puede el mismo elemento químico (carbono) ser duro o blando?"

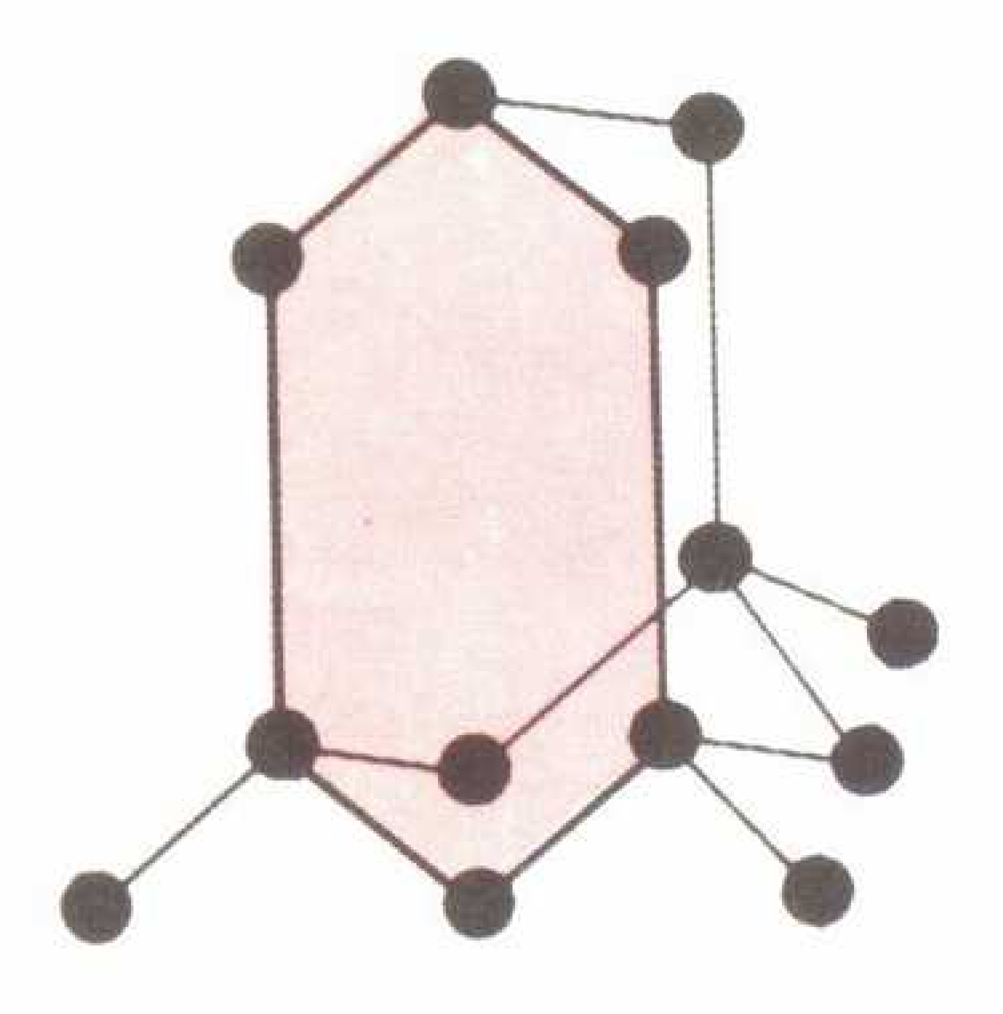


Fig. 1-26. Estructura del diamante (células tetrahédricas unidad).

La *difracción con rayos X*, que se explica en los textos más avanzados, revela que los átomos del diamante están dis-

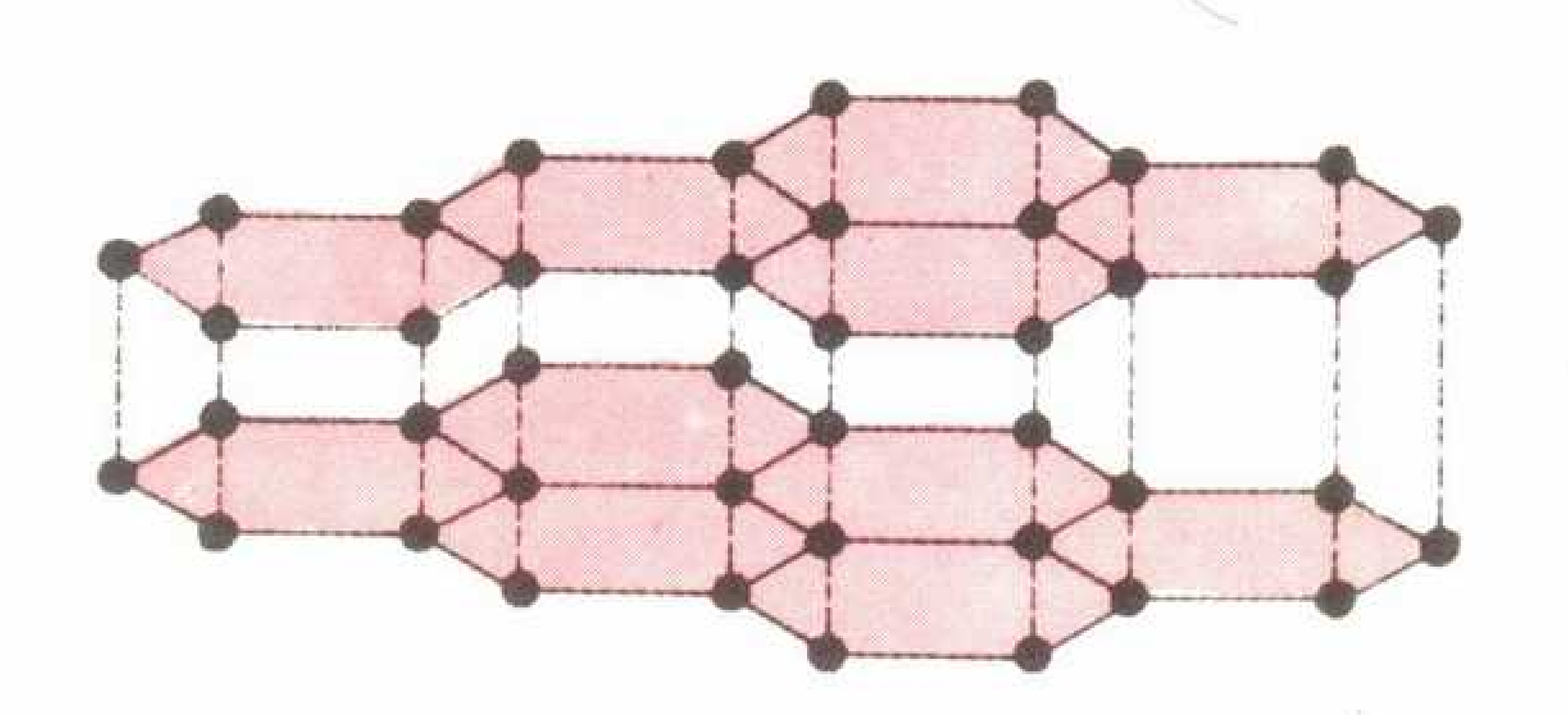


Fig. 1-27. Estructura del grafito.

puestos según un sistema cúbico, hallándose muy cercanos entre sí. Debido a que cada átomo de carbono está firmemente unido a los otros cuatro, podemos considerar la celda unitaria como un *tetraedro* (pirámide de cuatro caras) que tiene un átomo de carbono en la cúspide y los otros cuatro en las esquinas de la base (fig. 1-26). El modelo es extremadamente estable y resiste cualquier intento de deformación. El lector puede recordar de los estudios anteriores que un grupo de balas esféricas de cañón, apiladas en la forma de pirámide tetraédrica, constituye una disposición muy estable que representa el agrupamiento más estrecho posible que puede realizarse con ellas. Por analogía, el agrupamiento estrecho de los átomos de carbono en el diamante asegura la estabilidad y en consecuencia su dureza.

En el caso del grafito, el modelo tetraédrico está aplanado según una serie de agrupamientos *exagonales* o en "capas" paralelas y entre las cuales existe una distancia de aproximadamente 2 Å a 3 Å (fig. 1-27). El debilitamiento de las ligaduras permite que una capa de grafito se deslice fácilmente sobre la otra. Como resultado, el gráfito es escamoso, blando y se puede resquebrajar.

En la actualidad muchas de las propiedades de los metales se obtienen a voluntad. Los aceros para herramientas de alta velocidad pueden hacerse extremadamente duros calentándolos a aproximadamente

1.300°C y luego enfriándolos rápidamente, algunas veces en nitrógeno líquido (templado). Sin embargo, la dureza resultante está acompañada por una cierta fragilidad, o susceptibilidad a fracturarse. Si posteriormente se recalienta al acero hasta aproximadamente 200°C y luego se lo enfría muy lentamente, (*revenido*) existe una pequeña pérdida de la dureza pero una marcada ganancia en cuanto a la *resistencia mecánica*, o sea resistencia al choque. La fig. 1-28 atestigua el éxito de la investigación moderna en metalurgia cuando se la aplica a la producción de proyectiles de artillería, haciéndolos capaces de penetrar gruesas planchas de acero.

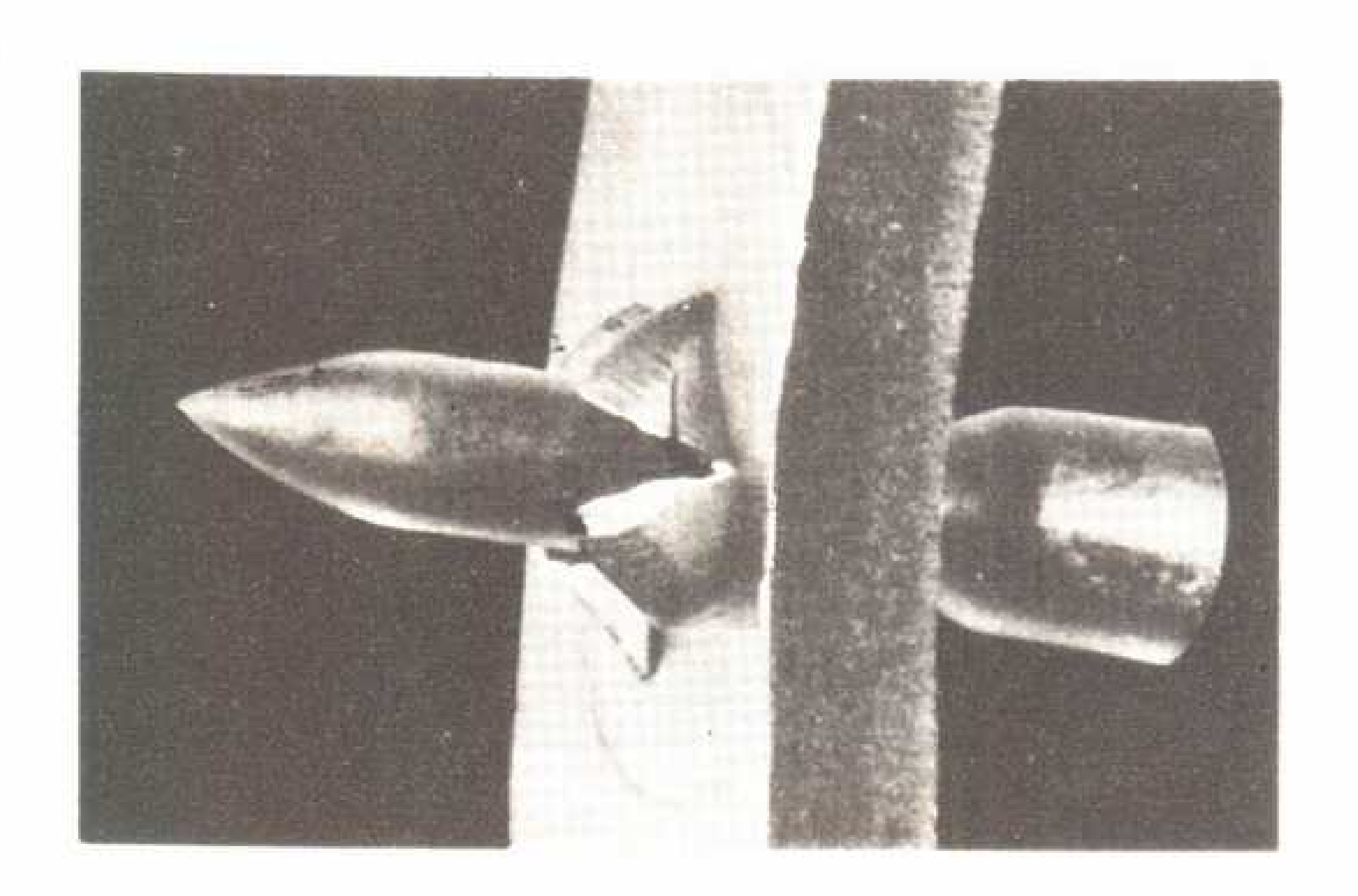


Fig. 1-28. Resultado de la investigación metalúrgica aplicada al diseño de proyectiles de artillería.

Es interesante hacer notar que el *vidrio* —sólido amorfo que tiene ciertas características del estado líquido— puede "templarse" (calentándolo y enfriándolo lentamente), aumentando en forma considerable su resistencia mecánica. La botella de "Bolonia" de paredes delgadas, producida de esta manera, puede ser martillada o golpeada contra una mesa sin que se dañe, pero se hace violentamente pedazos dejando caer en su interior un pequeño cristal de borde aguzado de carborundo (carburo de silicio) (ver fig. 1-29). Las tensiones desiguales, originariamente "congeladas" y mantenidas bajo control, se liberan repentinamente por este "elemento irritante" local y producen el colapso de toda la estructura.

Los metales pueden martillarse o laminarse en forma de láminas delgadas. A

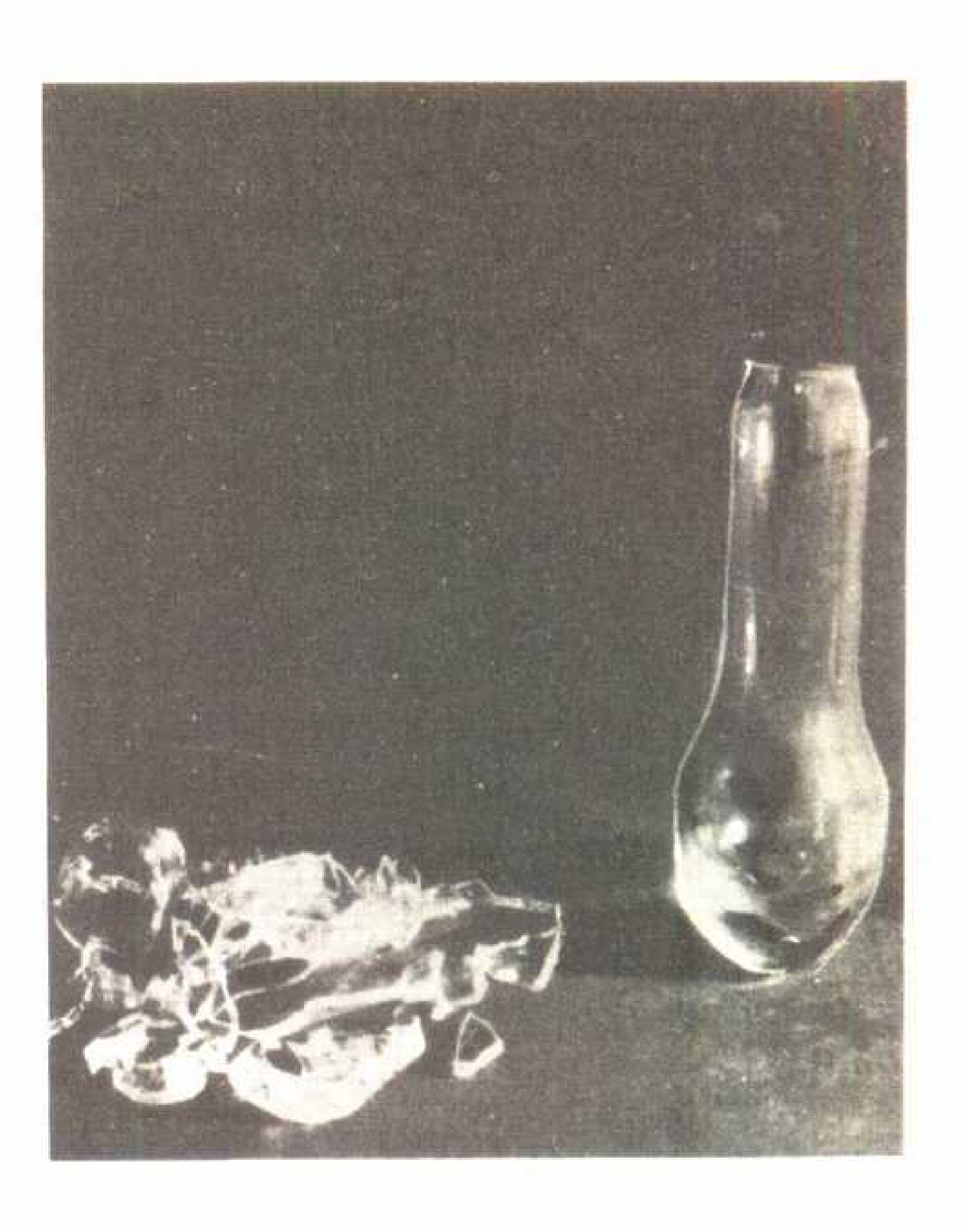


Fig. 1-29. Botella de Bolonia.

esta propiedad la denominamos *maleabilidad*. Se pueden obtener hojas de oro de un espesor inferior a 0,0001 mm martillando suavemente láminas de metal más gruesas colocadas entre trozos blandos de cuero (batidores de oro). Se vuelven así suficientemente delgadas como para ser transparentes. Otros metales, tales como el cobre y el aluminio, también son maleables, si bien no hasta el mismo grado que el oro. La maleabilidad presupone un *flujo* real de metal en sentido de cualesquiera de los tres ejes de la estructura cúbica de cara centrada del metal.

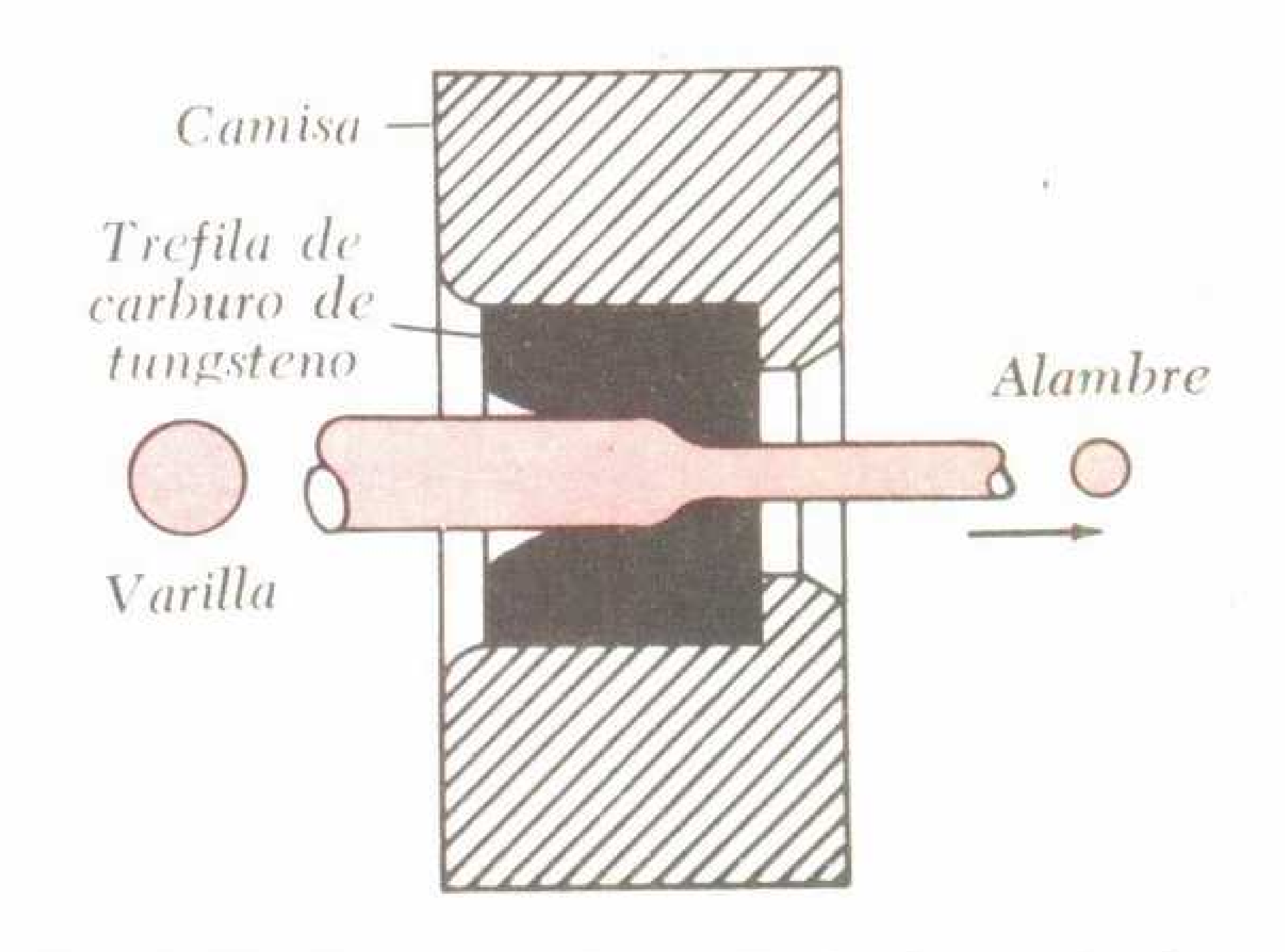


Fig. 1-30. Diagrama del trefilado de un alambre.

En general, los metales son *dúctiles* y maleables. La ductilidad permite la deformación plástica en un sentido bajo un estado de tensión, sin que se produzca ruptura. En la fig. 1-30 se ilustra la propiedad de ductilidad observándose en la misma como se tira de una varilla a través de una hilera a fin de obtener un alambre. Por ejemplo, el filamento de tungsteno de una lámpara incandescente de 5 vatios, 115 voltios, de sólo 0,013 mm y escasamente perceptible a simple vista, se obtiene calentando primero polvo de tungsteno "sinterizado" hasta que posee una pequeña sección transversal, y luego sometiéndolo a varias trefilaciones sucesivas.

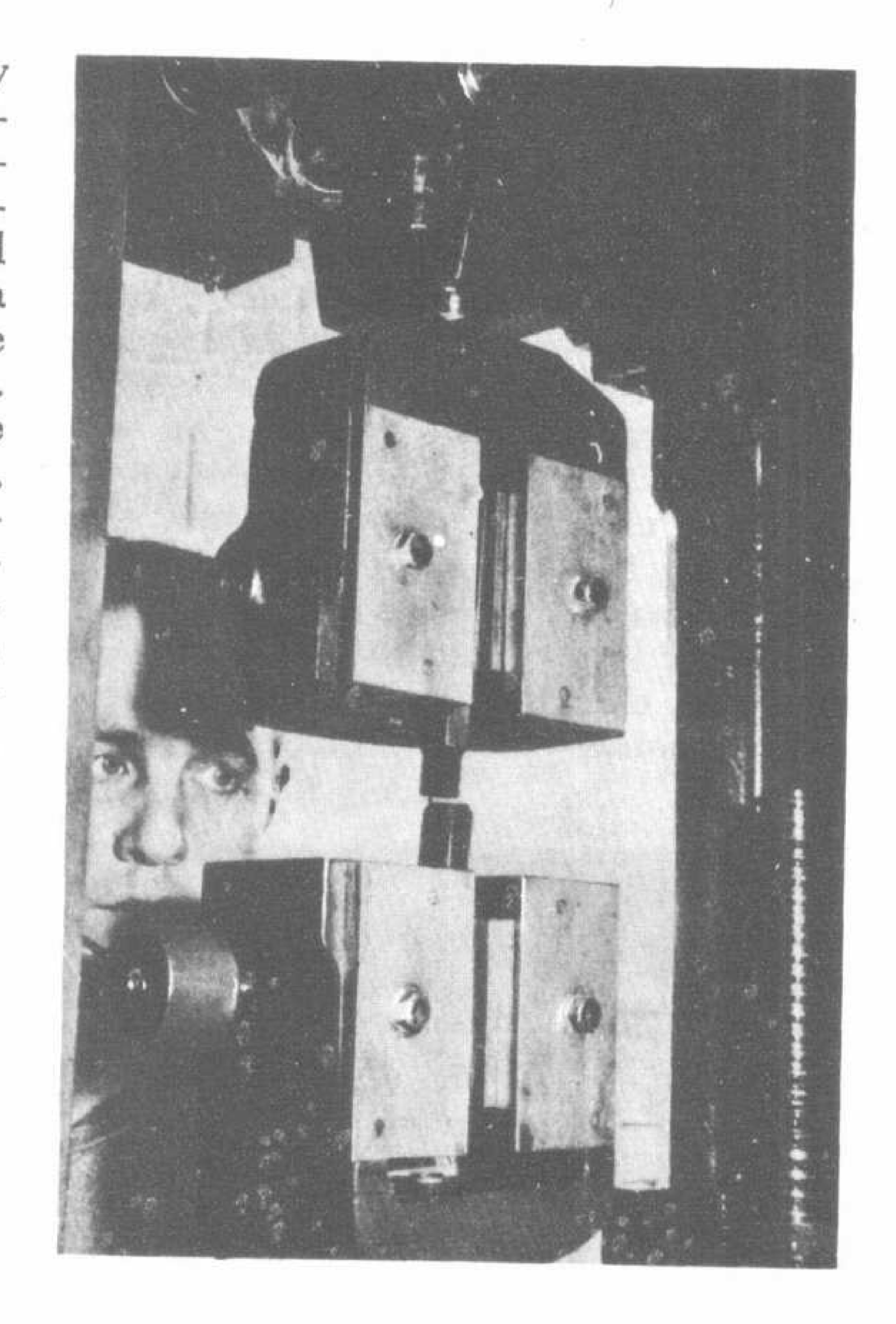


Fig. 1-31. Ensayo de resistencia a la tracción en una muestra de plástico. Las piezas se rompen bajo una tensión de 770 kg/cm^2.

10 ELASTICIDAD, LEY DE HOOKE, Y EL LIMITE ELASTICO

Ya hemos observado que la aplicación de una fuerza a un cuerpo puede originar su deformación plástica. Cuando se suprime la fuerza, un cuerpo *perfectamente elástico* recupera su forma primitiva, mientras que un cuerpo *perfectamente inelástico* no logra de ninguna manera recuperarla. La elasticidad prácticamente perfecta puede prevalecer hasta un cierto punto denominado *límite de elasticidad* más allá del cual es imposible toda recuperación.

La elasticidad depende de la *tensión* y del *alargamiento específico*. Definimos la tensión como la relación de una fuerza, F (aplicada a los extremos de una barra de ensayo) respecto a la sección transversal de la barra, A (tensión $= F/A$). El alargamiento específico es la relación de la variación de longitud ($\Delta\ l$) de la barra de ensayo respecto a su longitud primitiva, l (alargamiento específico $= \Delta\ l/l$). La tensión puede expresarse en kilogramos por centímetro cuadrado, el alargamiento específico es un coeficiente.

La ley de Hooke enunciada por primera vez en 1676, establece que para un cuerpo elástico *el alargamiento específico es directamente proporcional a la tensión.* La ley es válida sólo hasta el límite de elasticidad (*punto de deformación*). En un cierto punto más allá del límite de elasticidad, la muestra en estudio se rompe completamente. La fig. 1-31 representa una barra plástica que se rompe al ser sometida a una tensión de 770 kg/cm^2. El aparato utilizado para hallar la tensión de ruptura mide el esfuerzo de tracción que actúa sobre el material ensayado.

REPASO

Preguntas

1 Explicar porqué dos *elementos ópticos planos* cuidadosamente pulidos se adhieren sin necesidad de adhesivos.

2 En base a la teoría cinética-molecular de los gases, explicar; (*a*) porqué los gases son compresibles, (*b*) porqué los gases se difunden, (*c*) porqué los gases ejercen presión sobre los recipientes que los contienen.

3 El extremo de una varilla de vidrio blando puede redondearse calentándola simplemente con la llama de un mechero Bunsen. Explíquelo.

4 Se hacen flotar en el agua dos escarbadientes uno al lado del otro y paralelos entre sí. Entre ellos se arroja una gota de alcohol. Explique porqué los escarbadientes se apartan.

5 Explique la causa de porqué ciertos insectos, tales como los "zancudos de agua", logran "caminar por el agua" sin que sus extremidades se mojen. Trate de trazar un diagrama en base a su respuesta.

6 Trace el menisco o curva de contacto para el agua alojada en una copa de papel encerado; para el mercurio existente en un vaso de oro. Explique estas curvas.

7 Explique la causa de porqué los trocitos de alcanfor recién cortados se desplazan en todas las direcciones cuando se los sumerge en agua.

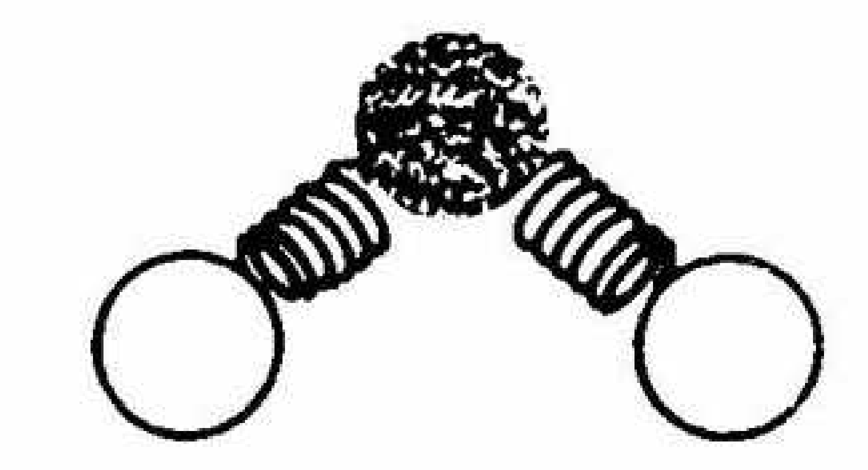
8 Ordene de acuerdo con la viscosidad creciente a los tres líquidos siguientes: alcohol, alquitrán ablandado y glicerina.

9 Las municiones de plomo se fabrican comúnmente virtiendo plomo fundido a través de un tamiz y dejándolo caer en el interior de un recipiente lleno de agua. Explíquelo.

10 ¿Cómo procedería usted para obtener agua "más húmeda"? ¿Puede hacerla usted "más seca"?

11 En base a lo que ha estudiado respecto a cohesión, adherencia y tensión superficial, explique la causa de porqué el agua asciende por un tubo delgado (capilar).

12 Utilizando un modelo de esferas y resorte de una molécula de agua (ver esquema), dibuje un cristal de nieve hexagonal de "cara abierta".



13 ¿Cuál es la fuerza que mantiene unidos a los átomos en una celda unitaria de cloruro de sodio?

Problemas

1 Se aplica una fuerza de tracción de 908 kg a una barra de ensayo que tiene una sección de 9,29 cm². Exprese la *tensión* en kg/cm².

2 Una barra de 61 cm de longitud se alarga al ser sometida a una cierta tensión hasta alcanzar una longitud de 61,1 cm. Calcule el valor del alargamiento específico.

3 Una barra de *m* metros de longitud alcanza una longitud de *n* metros de longitud cuando se la somete a tensión en una máquina de ensayo. ¿Cuál es el alargamiento específico resultante?

4 Un peso de 2,27 kg hace que un resorte de acero se estire 2,5 mm. ¿Cuánto se estirará el resorte si se lo somete a una carga de 13,6 kg? (Supóngase que no se ha alcanzado el límite de elasticidad.)

5 Trace un gráfico en el que se indique la relación existente entre la tensión y el alargamiento específico para un cuerpo perfectamente elástico.

6 La fuerza mínima necesaria para romper una soga cuya sección es de 1,3 cm² es 317,8 kg. Calcule la tensión mínima para romper la soga.

INTRODUCCION AL ATOMO

2

1 NOCIONES GENERALES

Si bien la creencia en la divisibilidad de la materia fue mantenida por los primeros filósofos griegos, la idea del átomo químico fue recién lanzada por primera vez por John Dalton a comienzos del siglo XIX. Hoy, el hasta entonces "indivisible" átomo se considera de carácter complejo y se ha logrado su subdivisión en partículas más elementales. Aun el flujo de energía, que siempre fue descripto como de carácter continuo e ininterrumpido, se considera actualmente como una sucesión de "manojos" individuales o *cuantos*. El "atomismo" ha invadido a toda la física moderna.

¿Cuándo comenzó la búsqueda de las partículas subatómicas? Para hallar una respuesta a esta pregunta debemos retrotraernos a fines del siglo pasado, época en la cual se lanzaron una serie de ataques experimentales contra el hasta ese momento inmutable y supuestamente indivisible átomo. Los rayos X fueron descubiertos en forma accidental por Wilhelm Roentgen (1895), y al poco tiempo se verificó que eran el resultado de una perturbación subatómica en el material de la superficie de emisión del tubo. En 1896, Henry Becquerel descubrió la radioactividad natural del uranio y sugirió que podía ser debida a la desintegración de átomos complejos e inestables. Tres años más tarde, Pierre y Marie Curie aislaron el radio y el polonio, elementos que presentan una agitación interna o subatómica aun mayor. Los progresos en las bombas de vacío obtenidos en Inglaterra y Alemania permitieron el estudio de la conducción de la electricidad a través de gases rarificados, lo cual culminó en 1897 con la identificación de la más liviana de las partículas subatómicas, el *electrón*, por Sir Joseph J. Thomson.



SIR JOSEPH J. THOMSON (1856-1940)



ROBERT ANDREWS MILLIKAN (1868-1953)

En 1909, el físico americano Robert Andrews Millikan midió la carga transportada por el electrón. El modelo de átomo planetario fue desarrollado por primera vez por Lord Rutherford en 1911, y depurado por Niels Bohr en 1913. La nueva *mecánica cuántica* fue desarrollada en 1925 para poder interpretar los resultados provenientes del rápido crecimiento de la teoría atómica.

2 HISTORIA DEL ELECTRON

A continuación describiremos una serie de experimentos que se relacionan con la conducción de la electricidad por los gases bajo presión reducida, que llevaron al descubrimiento del electrón. La fig. 2-1 representa un tubo largo de vidrio que tiene electrodos metálicos planos herméticamente sellados en cada extremo y una conexión para la bomba de vacío situada cerca de la parte central. Una bobina de inducción, que provee un alto potencial prácticamente unidireccional, está conectada a los electrodos. En paralelo con los terminales de alta tensión de la bobina se encuentra un explosor.

Cuando el gas contenido en el tubo está a la presión atmosférica normal, se

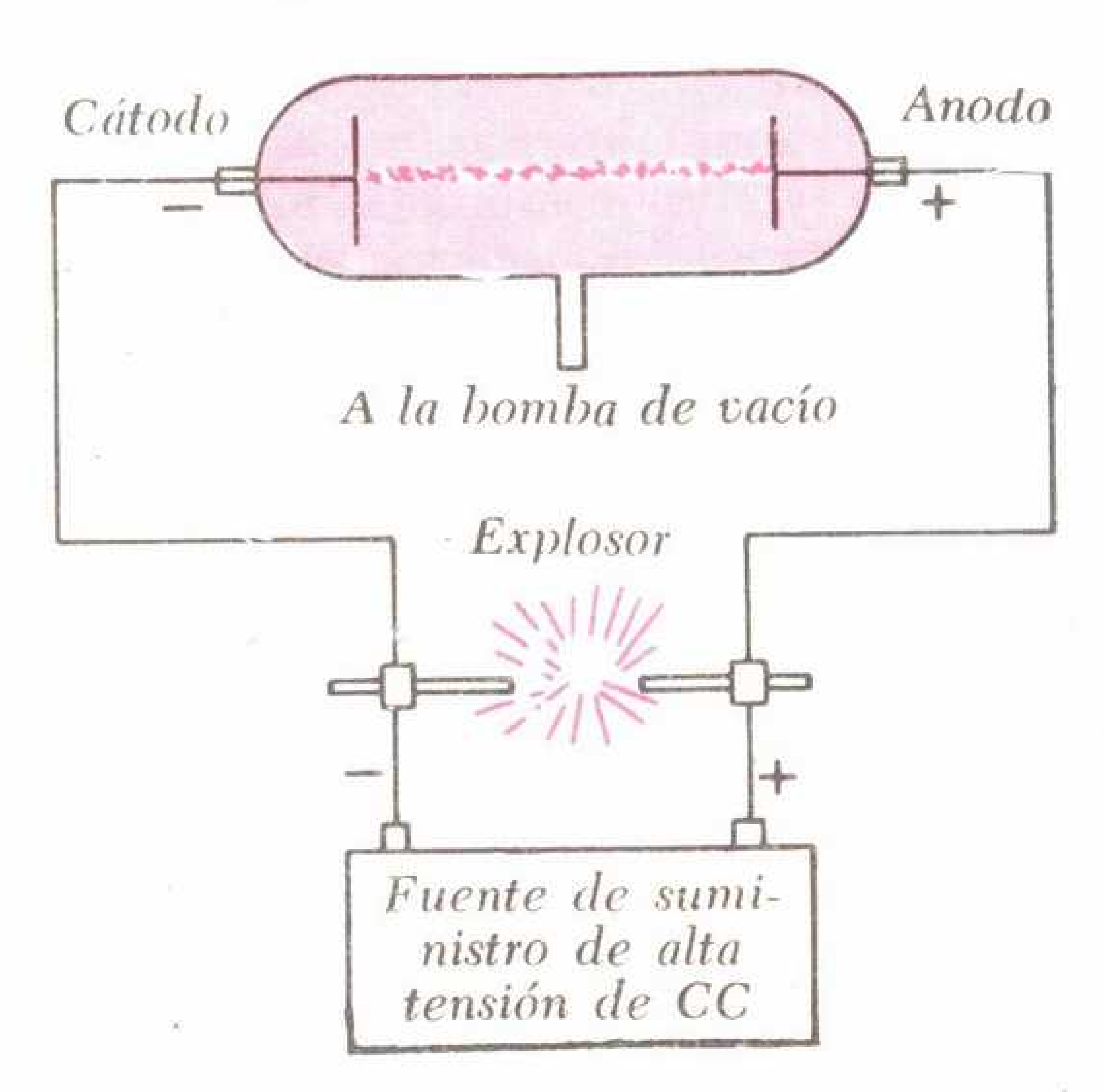


Fig. 2-1. Aparato para el estudio de la descarga eléctrica a través de gases.

produce una chispa entre los terminales del explosor de la bobina de inducción, pero a través del tubo no circula corriente. A medida que aumenta el vacío, el tubo se va haciendo conductor y cesa la descarga de chispas a través del explosor. Aplicando un potencial suficientemente alto a los electrodos del tubo y reduciendo la presión del gas a unos pocos centímetros de mercurio, se observa que pasan de uno al otro electrodo una serie de hilos delgados de luz de color azulado. A una presión de aproximadamente 1 a 2 mm de mercurio, alrededor de la superficie del cátodo se forma una *capa catódica* luminosa seguida por el denominado *espacio oscuro de Crookes,* que se ensancha en forma gradual a medida que aumenta el vacío en el tubo. Después del espacio oscuro se forma otra región luminosa, luego

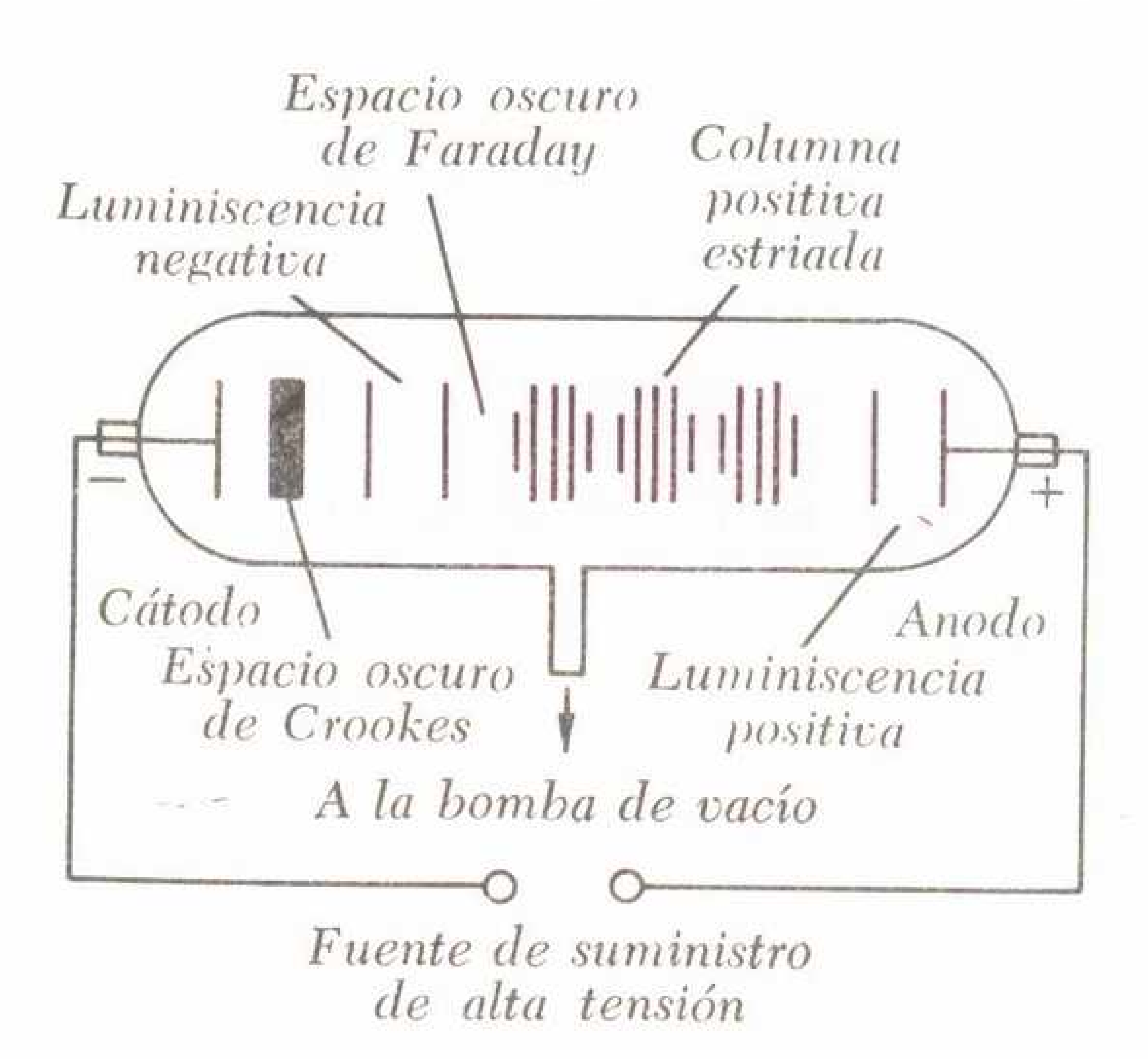


Fig. 2-2. Diagrama de la descarga a través de un gas a una presión de aproximadamente 1 mm de mercurio.

otro espacio oscuro y finalmente una *columna positiva* luminosa que se fragmenta en *estrías* o bandas alternadas de luz y oscuridad. A una presión aun más baja (aproximadamente 10^{-3} mm de mercurio), se observa una *fluorescencia* verdosa en el vidrio propiamente dicho, pero en el tubo no hay luz. En el momento en que existe un alto vacío, el tubo cesa de conducir debido a que en ese momento no hay iones presentes. La fig. 2-2 ilustra el aspecto del tubo a una presión de 1 mm de mercurio.

Los primeros observadores de estos fenómenos llegaron a la conclusión de que surgía cierto tipo de "emanación" del terminal negativo del tubo. La expresión *rayo catódico,* propuesta en aquel momento, sugiere que la emanación en cuestión sea interpretada como de carácter ondulatorio. Otros observadores pensaron que la descarga era de naturaleza *corpuscular* o similar a partículas. Sir William Crookes, primer investigador en este campo, hablaba de la luminosidad en sus tubos como de un "cuarto estado de la materia".

Posterguemos nuestras propias conclusiones hasta tanto no hayamos observado algunas de las propiedades de estos "rayos" cuando pasan a través de tubos de Crookes parcialmente evacuados.

• **Experimento 1.** Elijamos un tubo de diseño especial (fig. 2-3), con una cruz metálica sujeta al ánodo *A*. Es *C* el cátodo del tubo. Cuando se lo exicta mediante una descarga de

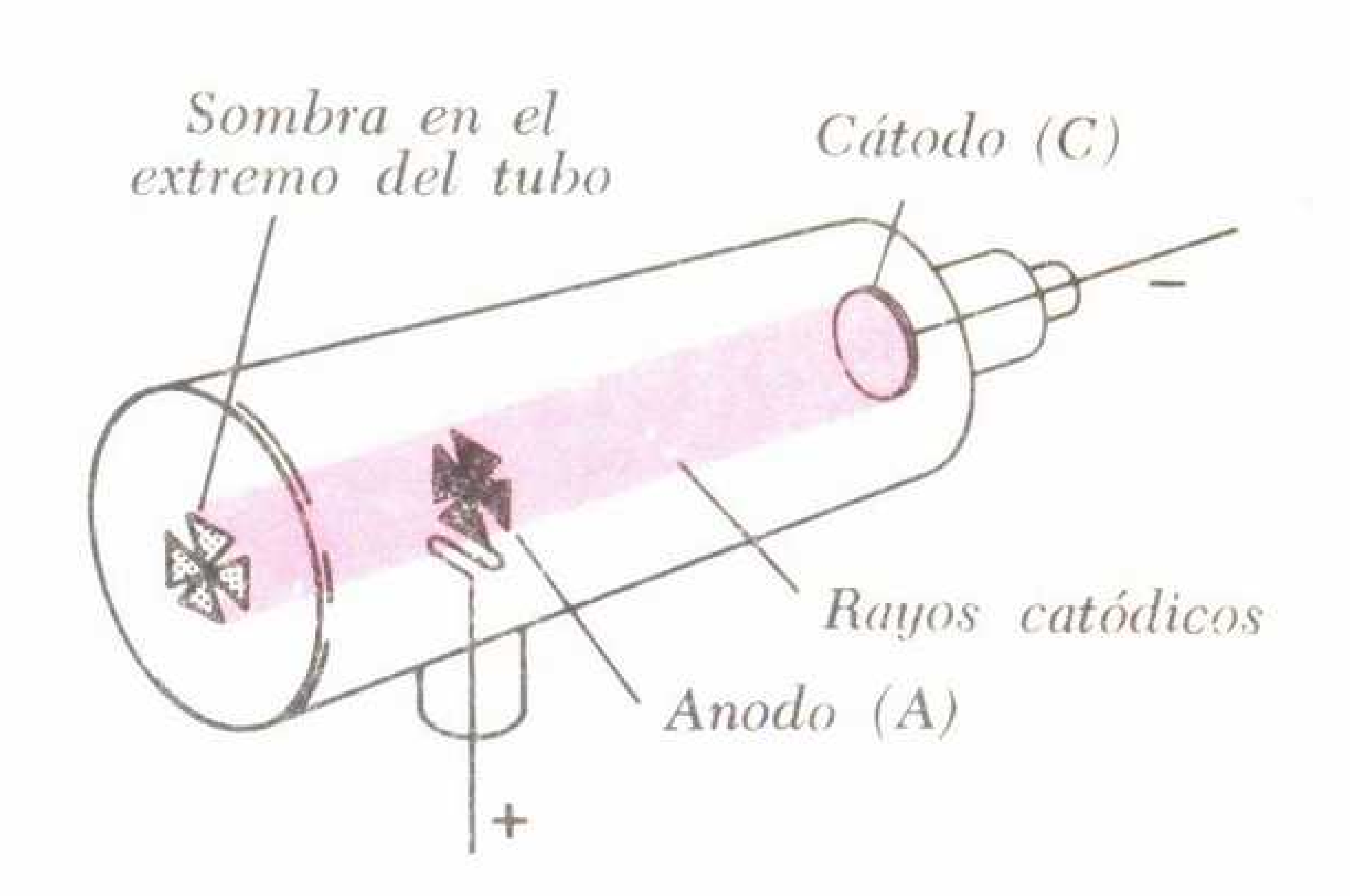


Fig. 2-3. Tubo de Crookes con una cruz de Malta.

alta tensión, se observa que el tubo posee fluorescencia en su extremo más ancho, rodeando el brillo a la *sombra* emitida por la cruz. *De ello sacamos en conclusión que la "emanación" del cátodo se desplaza en línea recta.*

• **Experimento 2.** En otro tubo diferente (fig. 2-4), se coloca sobre un carril especial dispuesto entre el cátodo y el ánodo uan pequeña rueda de paletas construida con delgadas aletas de mica. Cuando se excita el tubo en forma apropiada, la rueda comienza a desplazarse lentamente desde el cátodo hacia el ánodo, impulsada por el choque de los "rayos" catódicos. *De ello sacamos en conclusión que estos rayos poseen tanto masa como energía.*

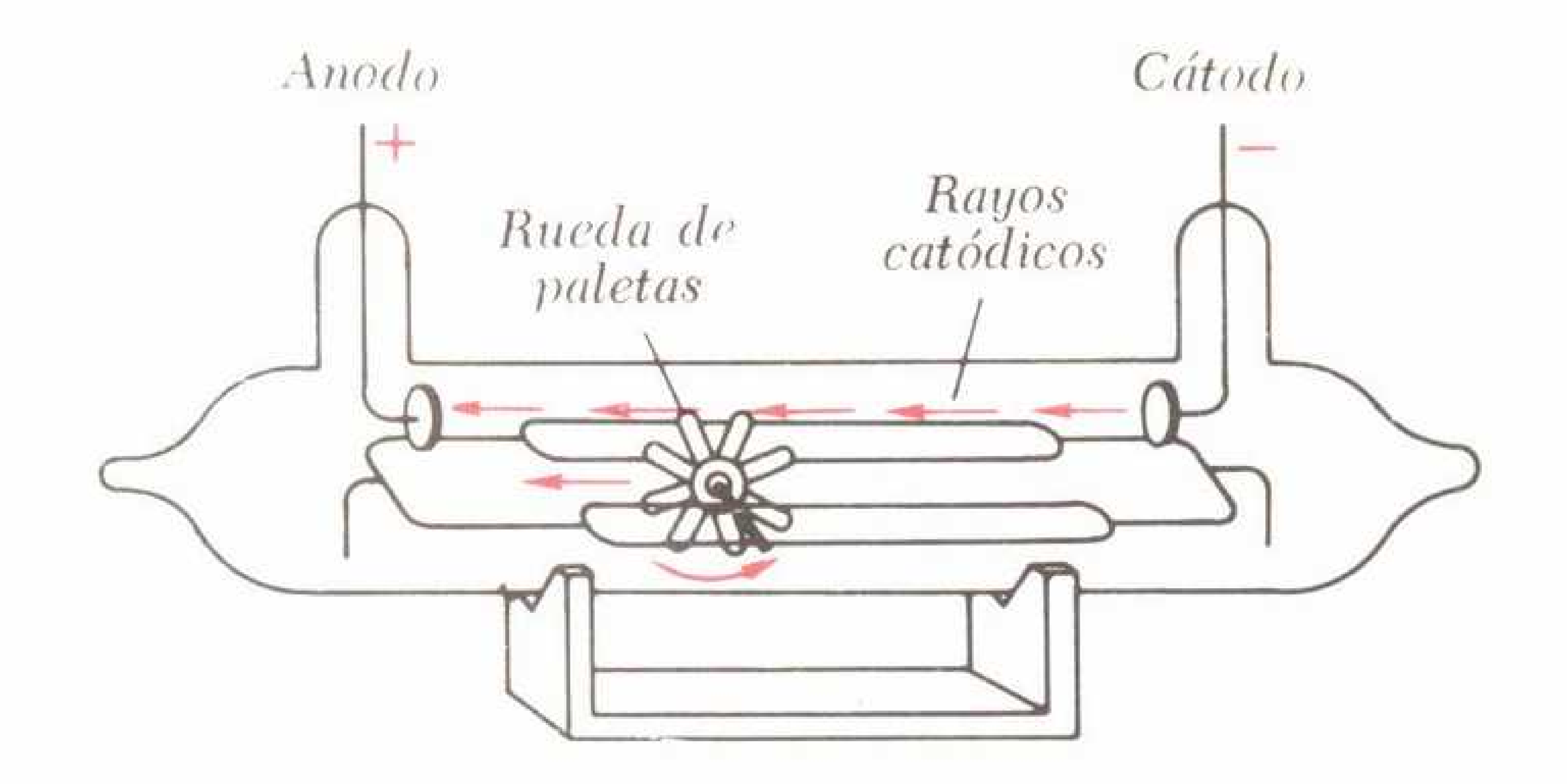


Fig. 2-4. Tubo de Crookes con una rueda de paletas con aletas de mica. La rueda es impulsada hacia la izquierda como resultado del impacto de los rayos catódicos.

• **Experimento 3.** En este experimento, colocamos dos imanes en forma de barra cerca de un tubo de Crookes en la forma ilustrada en la fig. 2-5. Se ve que los rayos catódicos que pasan a través de una rendija angosta y que dejan una estela luminosa sobre una pantalla fluorescente son desviados en dirección descendente en un caso y ascendente en otro cuando se invierte el campo. *De ello sacamos en conclusión que los rayos catódicos son desviados según una dirección perpendicular a su trayectoria primitiva y en sentido del campo magnético.* Obsérvese como la aplicación de la regla del motor de la mano izquierda predice el sentido de desviación. Se aplica la regla del motor en la *suposición* de que los rayos catódicos son electrones. La suposición parece válida si recordamos que sólo las *partículas cargadas* y no las ondas pueden ser desviadas de esa manera.

Los rayos en estudio tienen otras propiedades, tales como la capacidad de ser desviados por campos electrostáticos, efecto sobre placas fotográficas, etc. En su experimento clásico, realizado en 1897, Sir Joseph J. Thomson equilibró las desviaciones opuestas producidas por los campos magnéticos y electrostáticos (fig. 2-6),

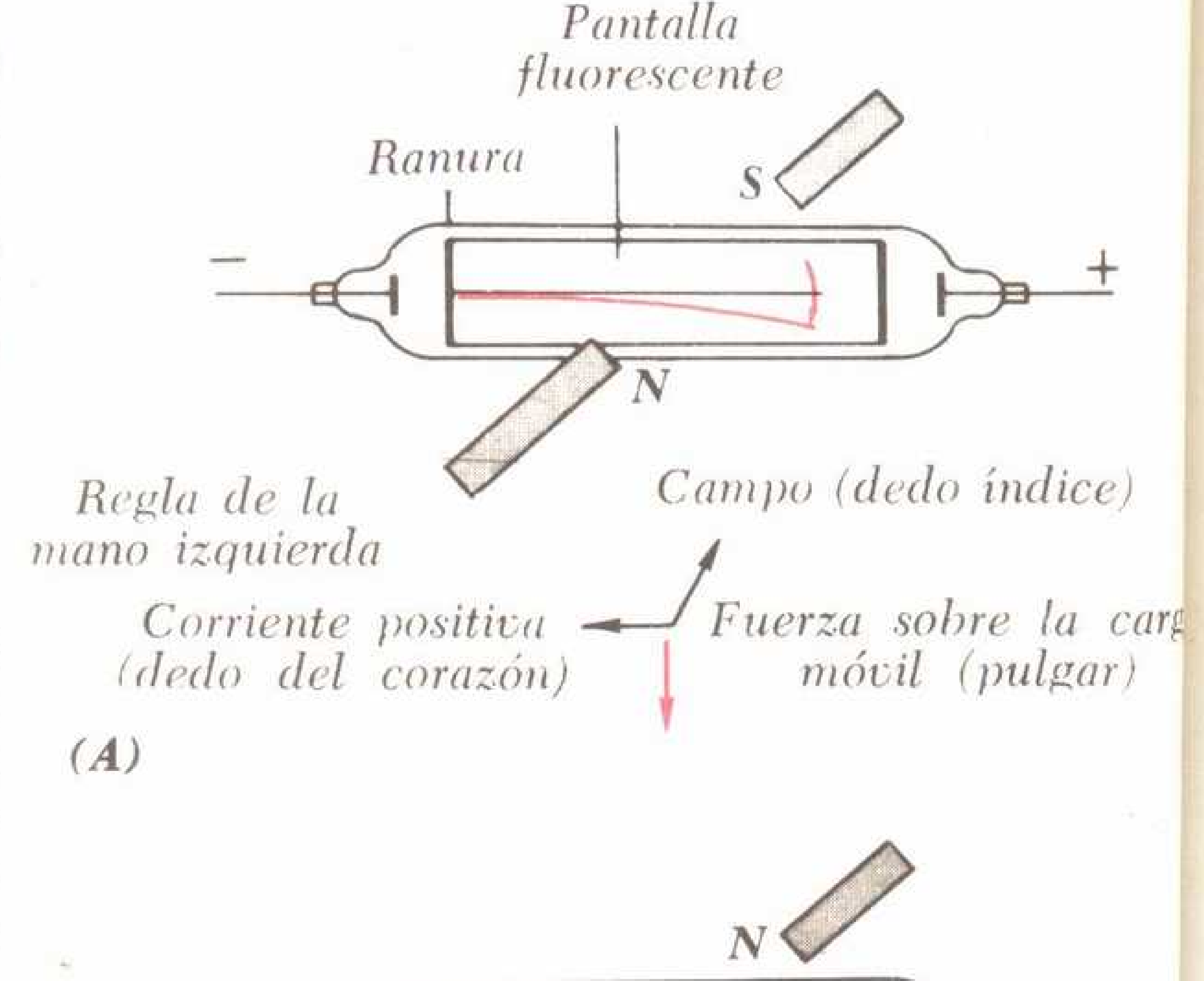


Fig. 2-5. Desviación de una corriente de rayos catódicos en un cuerpo magnético.

y fue capaz de determinar la *carga específica*, o *carga por unidad de masa* (e/m)

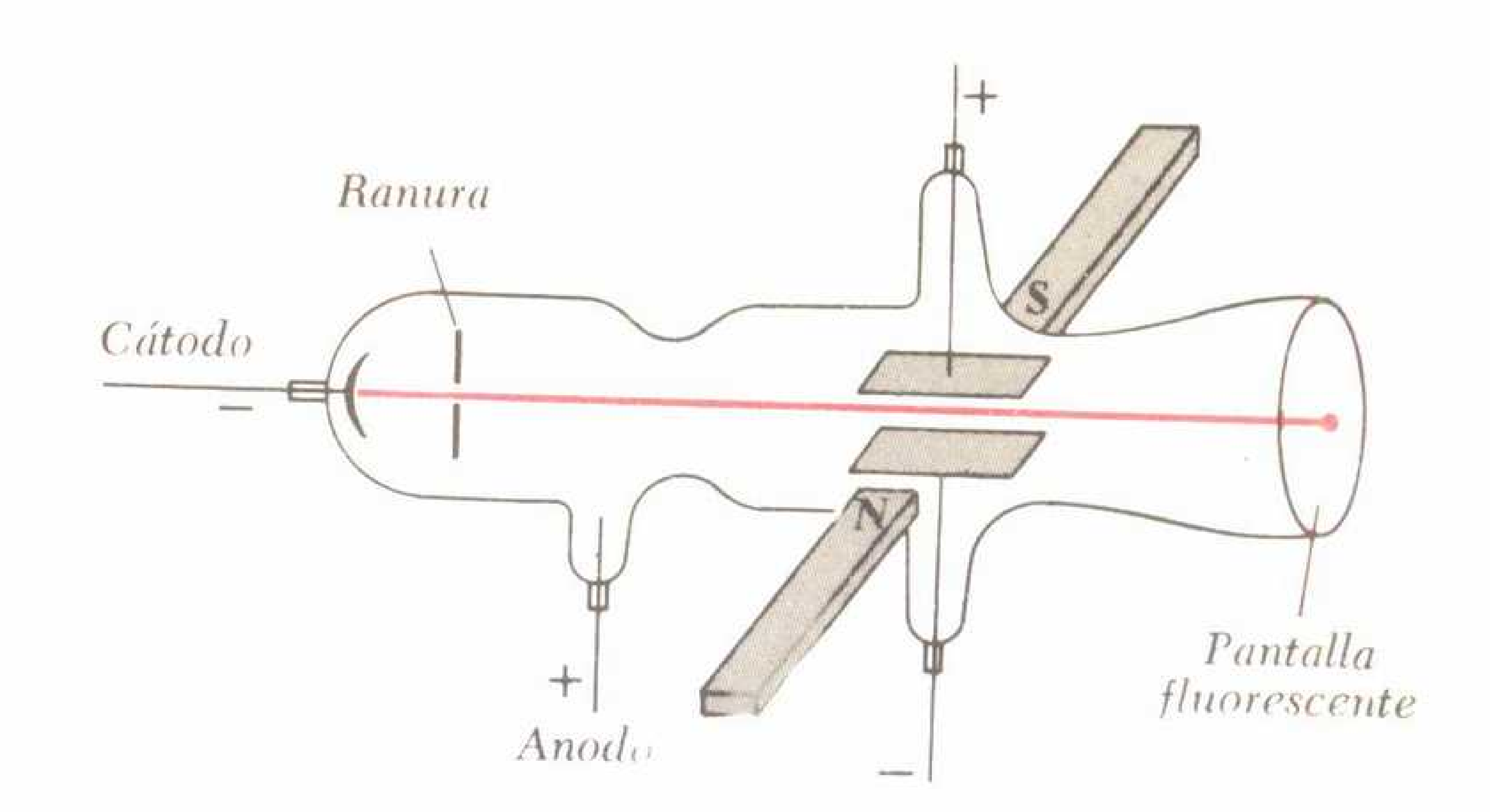


Fig. 2-6. Aparato de Thomson para medir la relación e/m de electrones. La combinación de campos electrostáticos y magnéticos impide que se desvíe el haz catódico.

de las que evidentemente eran *partículas* que se desplazaban a través del tubo. (A estas partículas las denominó *electrones.*) Thomson también midió la *velocidad* de estas partículas, deduciendo que era aproximadamente 1/10 de la velocidad de la luz en el vacío. Su conclusión importante fue que el valor de e/m era el mismo para los diferentes materiales catódicos y para los diferentes gases existentes en el tubo, variando sólo con la *clase* de partículas que era investigada.

La carga real transportada por un electrón (el numerador de la fracción e/m) fue determinada en 1909 por R. A. Millikan. Su aparato consistía en un par de placas metálicas situadas en un recipiente sometido a un vacío parcial, conectado a una fuente de energía que producía un campo que variaba de 3.000 a 8.000 V/cm (fig. 2-7). Se utilizó un atomizador para inyectar rocío de aceite en el recipiente, pasando las gotitas cargadas negativamente por la fricción con las paredes del atomizador, a través de la abertura existente en la placa superior hacia el interior del espacio entre las dos placas. Estando este espacio iluminado por una fuente exterior,

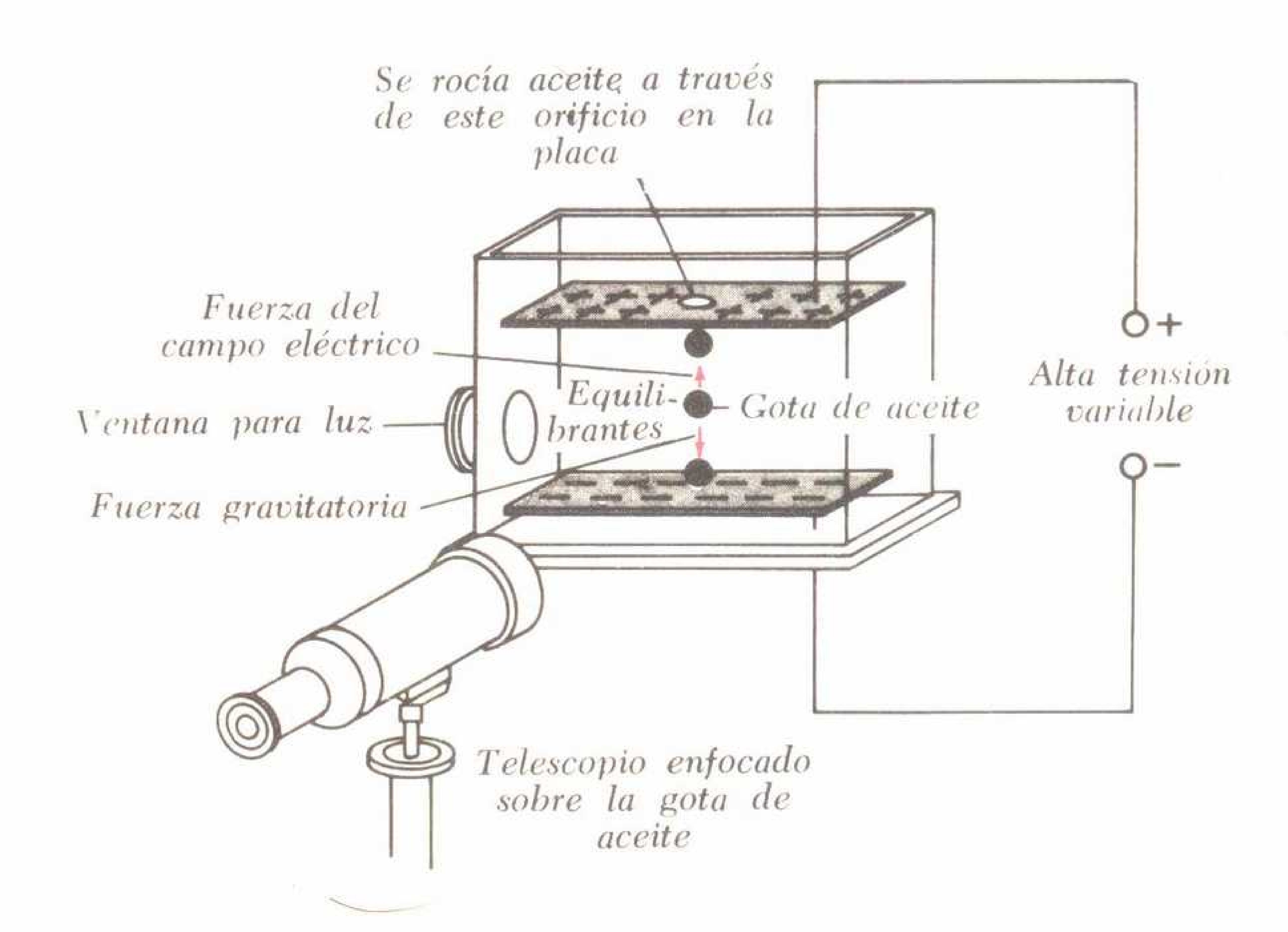


Fig. 2-7. Aparato de Millikan para medir la carga de un electrón.

mediante un telescopio se enfocó a las gotas de aceite, revelándose éstas en la forma de manchitas centelleantes.

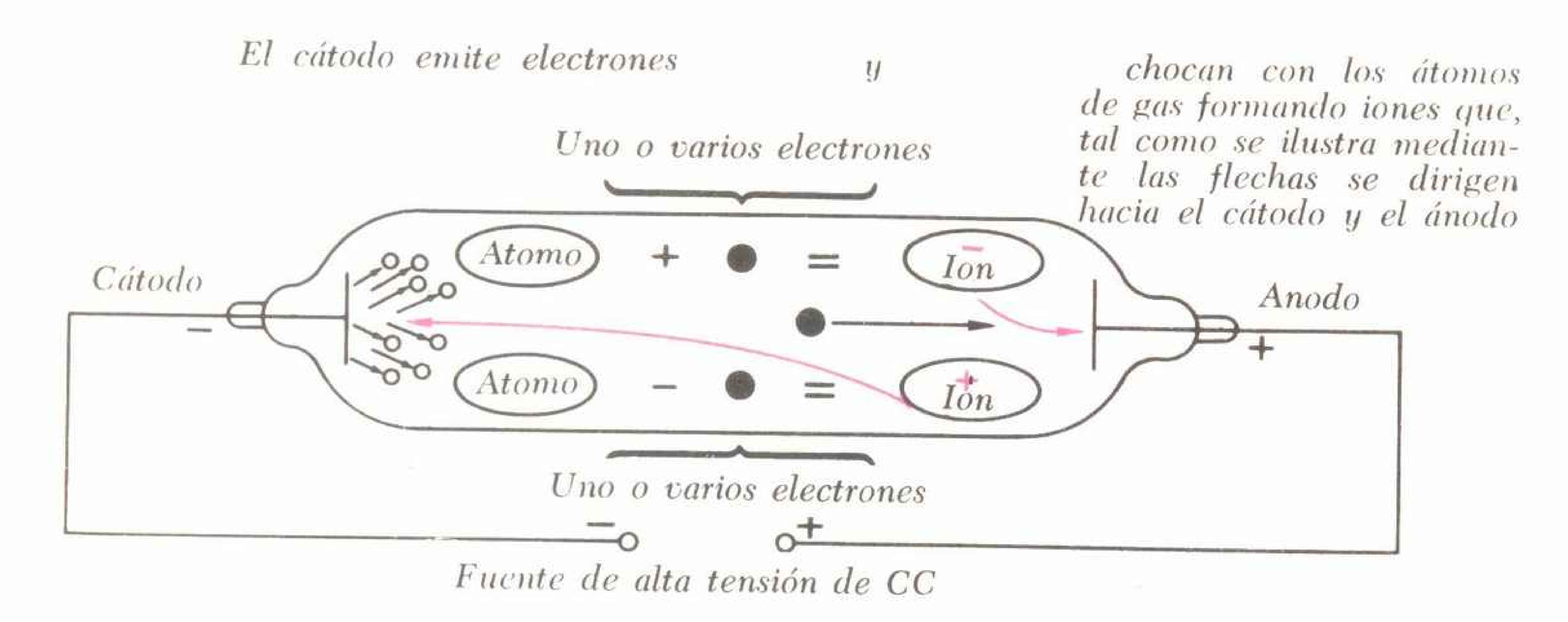


Fig. 2-8. Mecanismo de la formación de iones y proceso de conducción en un gas.

Millikan observó la velocidad de caída de las gotas de aceite cargadas en forma negativa cuando no se aplicaba una diferencia de tensión a las placas y cuando se hacía positiva la placa superior. En el segundo caso, halló que las gotas ascendían oponiéndose a la fuerza de la gravedad. Equilibrando las dos fuerzas, Millikan pudo mantener en estado estacionario entre las dos placas a una gota de aceite. Mediante cálculos cuidadosos obtuvo que los valores de la *carga total* transportada por las gotas de aceite, *siempre era igual a algún múltiplo entero de la carga elemental, e.* Así, con gotas más pequeñas y más grandes se obtuvieron valores más pequeños y más grandes de la carga negativa. El *submúltiplo* de las cargas observadas dio el valor de la *carga electrónica elemental.*

Actualmente el valor aceptado para *e* es $-4{,}80 \times 10^{-10}$ unidades electrostáticas o $-1{,}60 \times 10^{-19}$ C. La masa del electrón, obtenida a partir de su valor de e/m, es de aproximadamente $9{,}11 \times 10^{-28}$ g, que es 1/1.837 de la masa del átomo de hidrógeno.

Habiendo demostrado que los denominados rayos catódicos son en realidad *partículas cargadas (electrones)*, podemos ahora comprender por qué los gases bajo presión reducida conducen la corriente eléctrica. El gas no tiene cargas libres *inicialmente utilizables* para el transporte de electricidad. Bajo la influencia de fuertes campos eléctricos, las moléculas gaseosas se cargan o se *ionizan,* ganando o perdiendo uno o varios electrones. La falta de electrones crea iones positivos y el exceso crea iones negativos. Si se mantiene un vacío suficientemente alto en el tubo (de manera de que no obstruya el movimiento de los iones), los iones positivos se desplazan hacia el cátodo y los iones negativos y los electrones hacia el ánodo. La fig. 2-8 es una representación esquemática del mecanismo de la formación de iones en un gas rarificado y de los caminos seguidos por los iones en un tubo de Crookes.

3 EL PROTON

Los rayos positivos fueron descubiertos por primera vez en 1886 cuando E. Goldstein colocó un cátodo perforado en un tubo de vacío y observó trazos luminosos en la *parte posterior del cátodo* (fig. 2-9). Goldstein denominó a estos rayos "*kanals-*

trahlen" o *rayos canales*. Los primeros experimentos demostraron que transportaban carga *positiva*.

Se determinaron los valores de e/m para los rayos positivos que atraviesan una serie de gases diferentes bajo presión reducida. En cada caso, se halló que estos valores eran *menores* que el valor e/m previamente establecido para el electrón. El resultado para los iones de hidrógeno sugirió que el valor de m de éstos era considerablemente *mayor* que el de los electrones, debido a que, tal como se sospechaba, la carga e llevada por cada uno de ellos era probablemente la misma.

El físico inglés Lord Ernest Rutherford fue quien en 1914, confirmó la naturaleza del ion hidrógeno cargado positivamente, denominado posteriormente *protón*. En la actualidad sabemos que la masa del protón es aproximadamente $1{,}67 \times 10^{-24}$ g. La carga transportada por el mismo es prácticamente *igual y opuesta* a la del electrón, es decir, $+\,4{,}80 \times 10^{-10}$ unidades electrostáticas. Es evidente que los rayos positivos que atraviesan un tubo lleno de hidrógeno bajo presión reducida son en realidad *protones*. En el caso de otros gases, son otros *iones gaseosos* cargados positivamente, con diferentes valores de e/m, los que atraviesan el tubo.

Podemos mencionar ahora otra partícula positiva denominada *positrón* o *electrón positivo*. Esta partícula tiene la misma masa que el electrón pero posee una carga positiva igual en magnitud a la carga negativa del mismo. Los positrones son *partículas de transición* (de vida corta). Se combinan con los electrones, neutralizando su carga. La "aniquilación" de los dos conjuntos de partículas deja en libertad una cantidad de energía dada por la ecuación masa-energía de Einstein que se explica en el Capítulo 3.



LORD ERNEST RUTHERFORD (1871-1937)

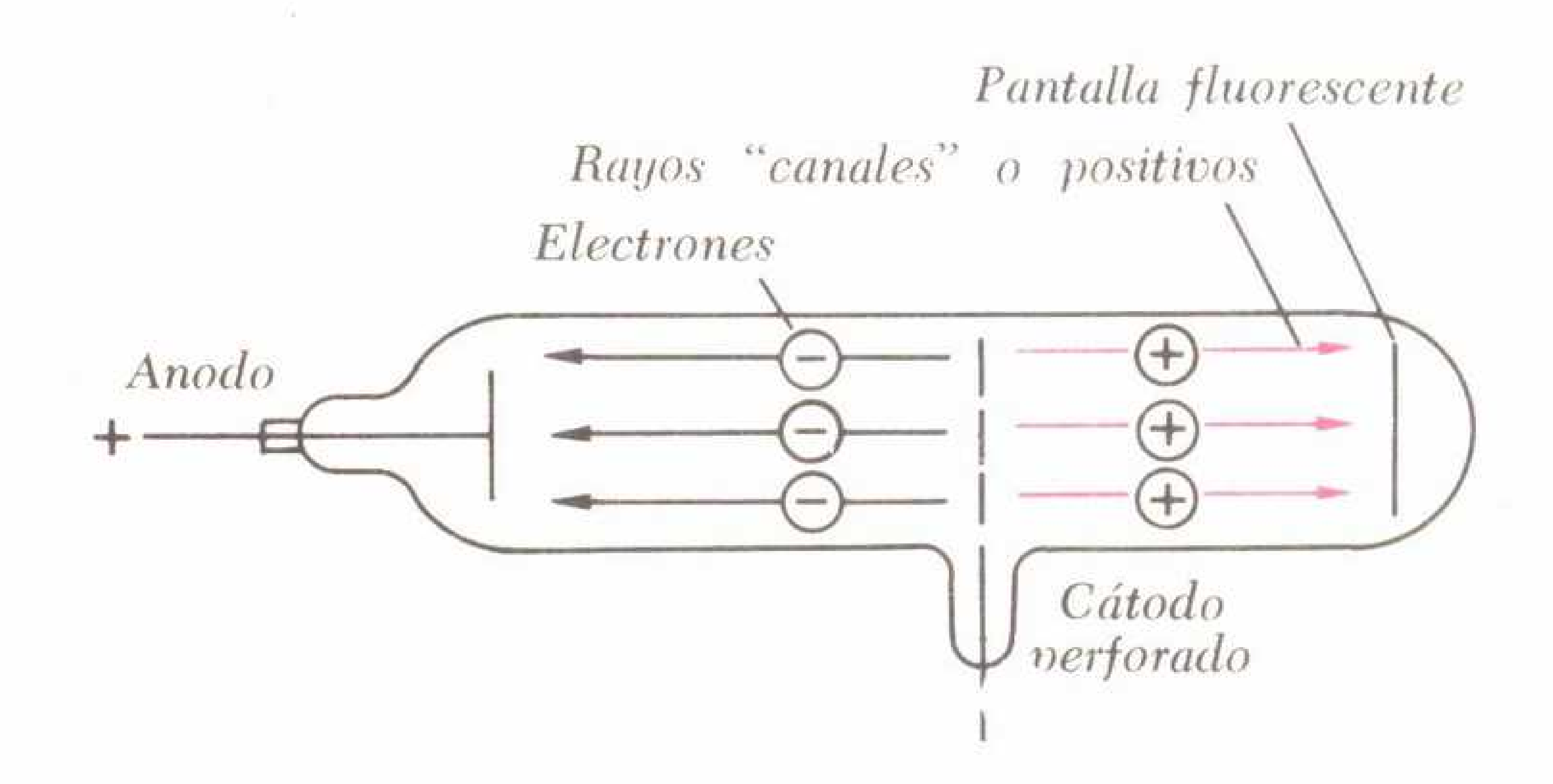


Fig. 2-9. Tubo de rayos positivos de Goldstein (1886). Las partículas que se mueven hacia la derecha son átomos o moléculas cargados positivamente.

4 EL NEUTRON

Este es el tercer "bloque constructivo" esencial de la materia, que entra juntamente con el protón, en la composición del núcleo del átomo. La partícula, cuya masa es sólo ligeramente mayor que la del protón y no transporta *ningún tipo de carga eléctrica,* fue aislada en 1932 por James Chadwick. Chadwick halló que esta partícula era emitida desde los núcleos de berilio o de boro cuando se bombardeaba a éstos con un núcleo de helio (partículas alfa).

En el Capítulo 3 hablaremos más respecto al neutrón cuando describamos la transmutación de los elementos, las reacciones nucleares, la radioactividad inducida y la fisión nuclear. Se describirán otras partículas subatómicas (actualmente existen aproximadamente 100) cuando se plantee la necesidad de ello. Por el momento, recordemos a las tres partículas fundamentales existentes en la estructura de los átomos, es decir, *protones* y *neutrones* (dentro del núcleo), y *electrones* (en el exterior del núcleo). Podemos expresar las masas de estas partículas en la escala de las masas atómicas, asignando 1 a la

Protón	Neutrón	Electrón
Masa 1	Masa 1	Masa 0
Carga +1	Carga 0	Carga −1
⊕	±	⊖
Símbolos		
$^{1}_{1}H$	$^{1}_{0}n$	$^{0}_{-1}e$

Fig. 2-10. Bloques constructivos fundamentales de los átomos.

masa del protón, 1 a la del neutrón, y 0 a la del electrón, de masa despreciable. Las cargas unitarias correspondientes son + 1,0, y — 1. Podemos representar esto simbolizando al protón como $^{1}_{1}H$, al neutrón como $^{1}_{0}n$, y al electrón como — $_{-1}^{0}e$. Los índices superiores indican la masa de las partículas en la escala de masas atómicas y el índice inferior la carga unitaria. La fig. 2-10 presenta un resumen gráfico de estos símbolos.

5 RADIOACTIVIDAD NATURAL

La transformación *espontánea* de un elemento pesado en otro liviano, observada por primera vez por Becquerel y los esposos Curie, se conoce como *radioactividad natural.* La actividad fotográfica de las sales de uranio fue originariamente atribuida por Becquerel a la fluorescencia, pero cuando el efecto se reprodujo aun en ausencia de una preliminar absorción de luz, se supuso que la fuente de actividad estaba dentro del mismo núcleo. Además de la acción fotográfica existía un fuerte efecto ionizante, que se observaba cuando las menas de uranio o los trocitos de radio y de polonio se colocaban en la proximidad de un electroscopio cargado. Esto tampoco podía explicarse salvo en función de la desintegración atómica.

La actividad del radio (estimada en más de 1.000.000 de veces la del uranio) puede juzgarse por la intensidad de las emanaciones que provienen, aparentemente en forma perpetua, de los núcleos de sus átomos. Si se coloca un trozo de radio o de algún otro material radioactivo en la parte inferior de una muesca angosta y larga practicada en un bloque de plomo y se coloca una placa fotográfica encima de éste, al revelarse la placa se hallará un punto visible, producido por el efecto de la emanación. La emanación puede "dividirse" en tres emanaciones particulares (y así producir tres puntos que aparecen sobre la placa fotográfica) si se aplica un fuerte campo magnético o electrostático en forma transversal a la línea de radiación, tal como se ilustra en las figs. 2-11A y 2-11B. En la fig. 2-11A, se ve que las *partículas alfa* (núcleos de helio) cargadas positivamente se desvian hacia la izquierda y las *partículas beta* (electrones) cargadas negativamente se desvían hacia

la derecha y los *rayos gamma* (ondas electromagnéticas cortas) neutros se desplazan sin desviarse. En la fig. 2-11B, se ilustra cómo se logra en forma electrostática la distribución de las partículas.

serie de elementos que podrían llamarse "hijos", algunos de los cuales son emisores alfa, otros emisores beta, en tanto que los rayos gamma acompañan a ambos tipos de radiación.

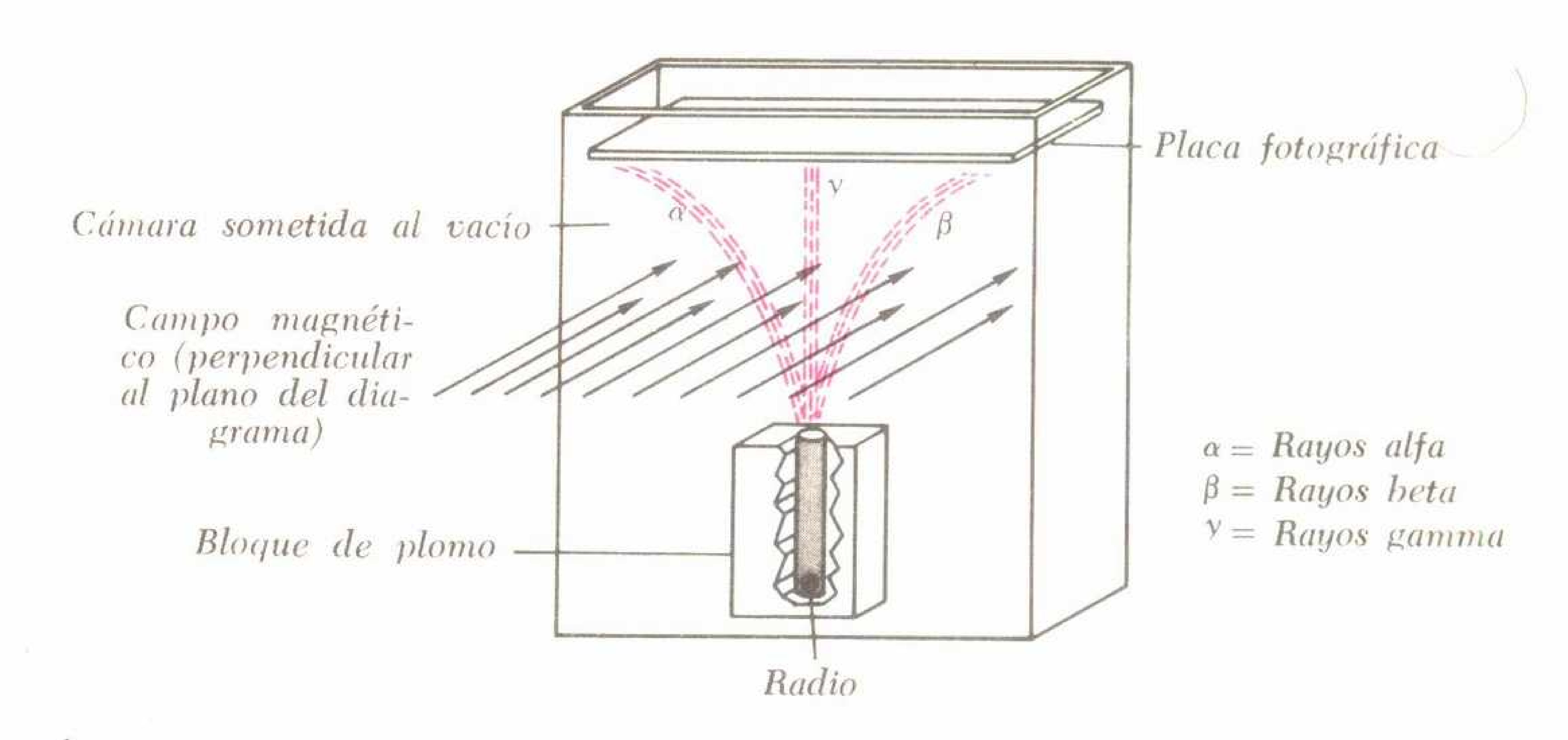


Fig. 2-11 A. Separación magnética de la "emanación" de radio en rayos alfa, beta y gamma.

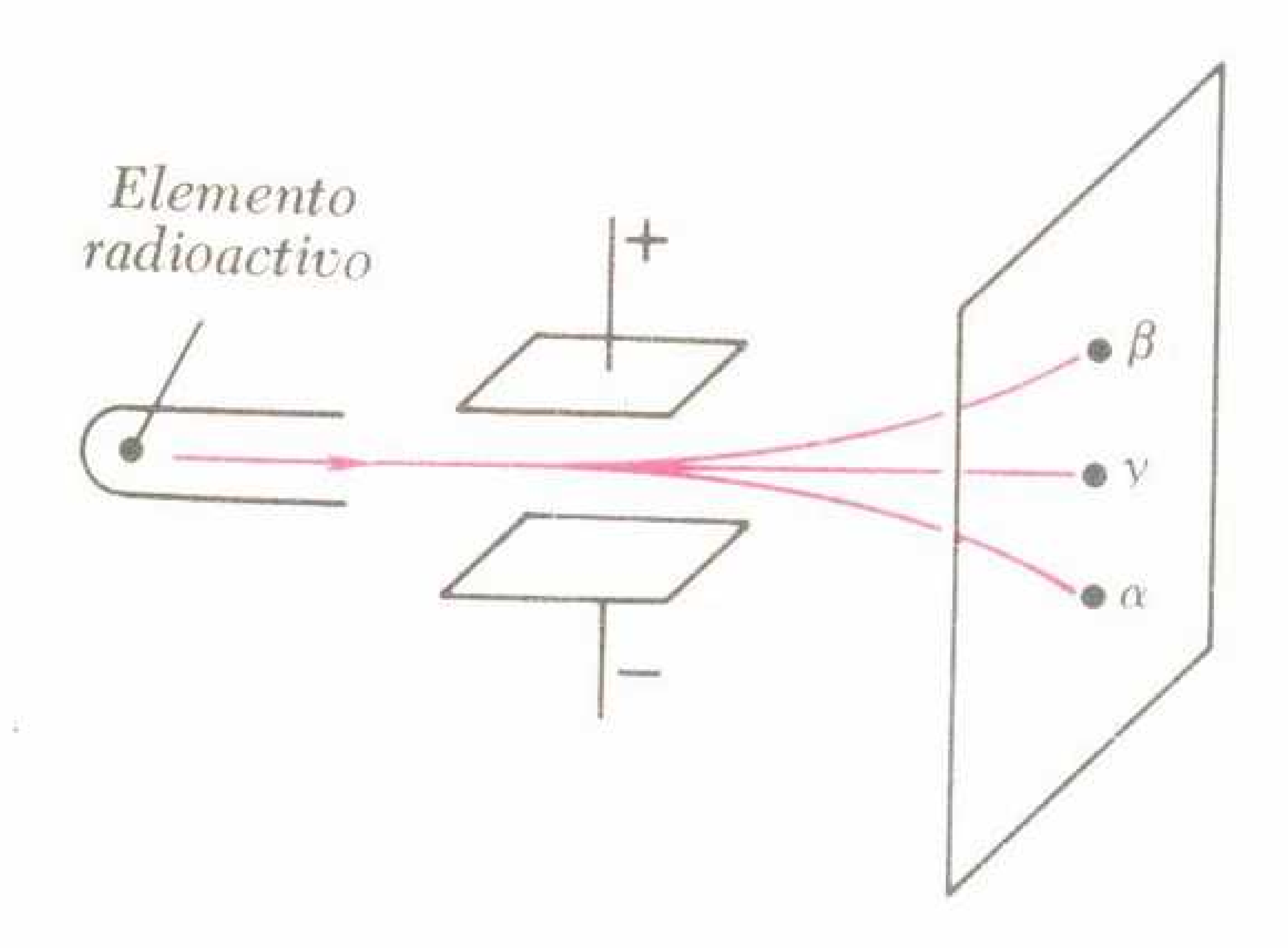


Fig. 2-11 B. Separación electrostática de una emanación "mixta" en sus componentes alfa, beta y gamma.

Es importante hacer notar que la mayoría de los materiales radioactivos emiten *ya sea* rayos alfa o beta, siendo acompañados cada uno de ellos por radiación gamma. El radio puro emite rayos alfa pero no beta. No obstante, cuando se cierra herméticamente un tubo, se forma una

La temperatura, presión y otras condiciones externas no tienen efecto sobre la radioactividad, que es estrictamente un proceso *nuclear*. La teoría de la desintegración radioactiva propuesta por Rutherford y Soddy en 1902, enfoca al proceso como la desintegración espontánea de un elemento "padre" en uno o varios elementos "hijos", desintegrándose nuevamente estos últimos para formar miembros adicionales de una "familia" o *serie* radioactiva. El proceso es de carácter *estadístico*, en el que se alcanza el equilibrio cuando la velocidad de formación de los elementos hijos es exastamente igual a su propia velocidad de desintegración. La proposición se aplica sólo a una *cantidad grande* de átomos que se forman y destruyen. *No existe ninguna certeza respecto a la historia de la vida o comportamiento futuro de algún átomo en particular.*

Llamamos *vida media* (T) el tiempo necesario para que se desintegre la mitad del átomo radioactivo en cuestión. Así, si la cantidad primitiva de átomos radioactivos es N, la mitad de esta cantidad, o sea

$N/2$, se presentará luego de un período representado por T. Después de otro período T, la cantidad de "sobrevivientes" será $\frac{1}{2}N/2$ o $N/4$, etc. La fig. 2-12 es una *curva típica de desintegración,* que ilustra la actividad, según intervalos de tres horas, de una muestra de 16 milicuries (mCi) registrada por un reloj de "vida media". Se hace evidente que, para la muestra en cuestión, $T = 3$ horas. La actividad del material disminuye rápidamente según una curva de carácter *exponencial.*

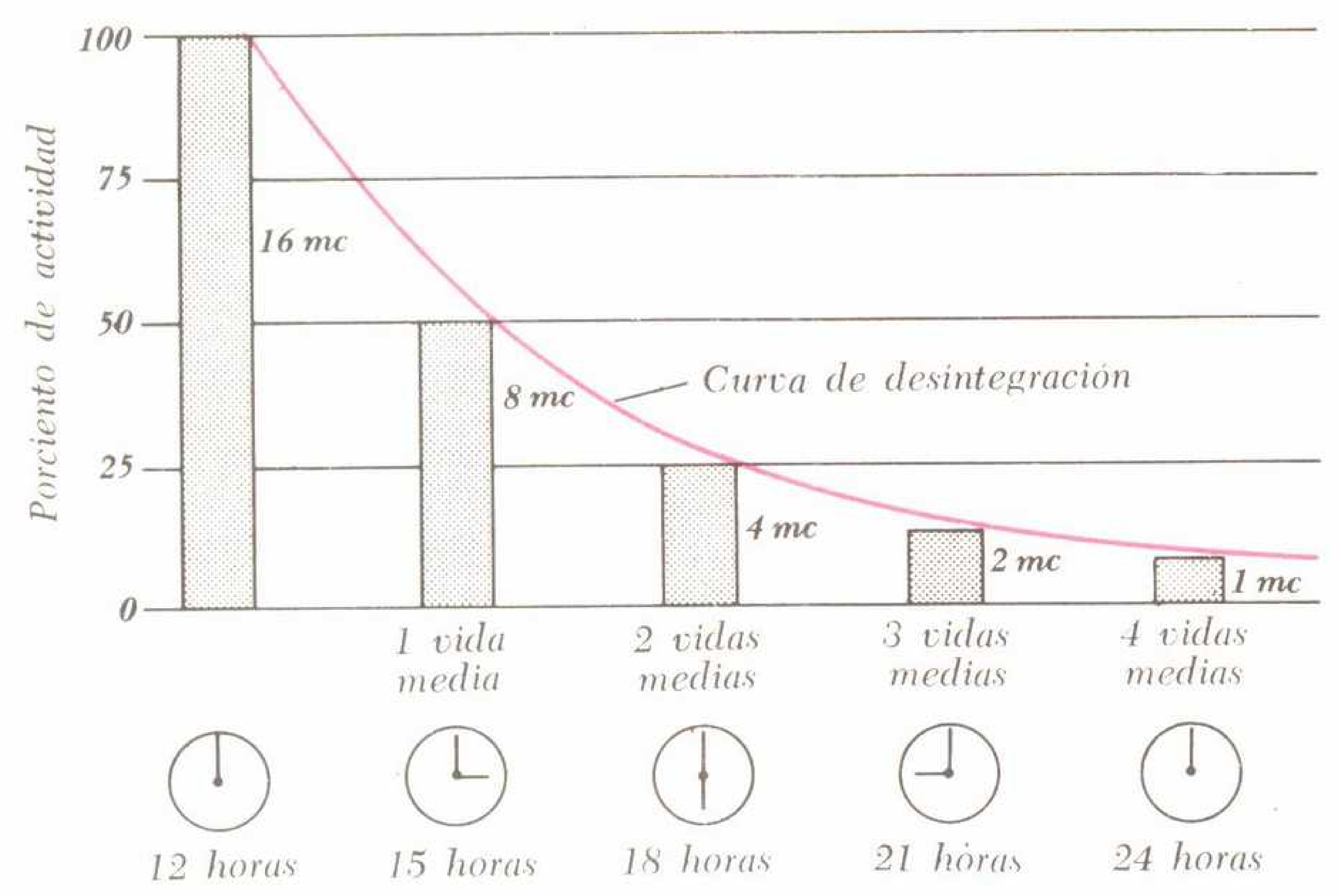


Fig. 2-12. Gráfico explicativo de la vida media.

Las vidas medias presentan diferencias considerables. Así, la del *uranio I,* el "señor" de la serie uranio-radio, es de 4,5 $\times 10^9$ años, la vida media del *radio* (uno de los "hijos" de la serie anterior) es de 1.600 años, mientras que la del *radón* (o emanación de radio) es de sólo 3,82 días. Es importante un conocimiento de la vida media de un radioelemento de una actividad específica dada, ya que el peligro existente debido a su uso es pequeño si el valor de T es pequeño, y recíprocamente, el peligro es considerable si el radioelemento en cuestión es de vida larga.

En la fig. 2-13 se ilustra un ejemplo interesante de *autorradiografía.* Un ventilador eléctrico, previamente expuesto a un fuerte haz de neutrones en un reactor nuclear (de lo cual se hablará con mayor extensión más adelante), se "autorradiografía" sobre una placa fotográfica debido a la radioactividad artificialmente inducida almacenada en el mismo. El resultado es muy similar al obtenido mediante un potente tubo de rayos X de alta tensión, si bien el carácter de la radiación es bastante diferente. La *radiografía gamma,* lograda mediante una fuente radioactiva externamente dispuesta tal como la de *cobalto-60* en lugar de un tubo de rayos X, produce imágenes que pueden registrarse directamente sobre una película fotográfica.

6 ALGO MAS SOBRE LOS RAYOS ALFA, BETA Y GAMMA

Rutherford fue el primero en investigar la naturaleza de las *partículas alfa.* Midió su valor e/m y halló que era la mitad del previamente establecido para el protón. Sacó en conclusión que esta forma de radiación era en realidad una corrien-

te de *iones de helio* cargados positivamente, cuya masa es cuatro veces mayor que la del protón y una carga sólo dos veces más grande. Rutherford fue también quien propuso la expresión *partícula alfa* y atribuyó el origen de estas partículas a la descomposición de núcleos inestagles. Simbolizamos una partícula alfa como $^{4}_{2}\mathrm{He}$, significando el índice inferior una carga de + 2, y el índice superior una masa atómica de 4.

Para confirmar su suposición de que la partícula alfa era en realidad un núcleo cargado de helio, Rutherford encerró en forma hermética una mezcla radioactiva emisora de rayos alfa en un recipiente de paredes delgadas el cual rodeó mediante otro recipiente sometido totalmente al vacío (fig. 2-14). Las partículas alfa psaban del primer al segundo recipiente donde cada una de ellas capturaba dos electrones y se convertía en *gas helio* común o no cargado de acuerdo con la reacción

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,^{0}_{-1}\mathrm{e} \rightarrow {}^{4}_{0}\mathrm{He}$$

El producto de la reacción fue ensayado mediante métodos espectroscópicos comunes y se halló que era helio. Esto explica la acumulación registrada de helio gaseoso en las menas de uranio y torio, que son conocidas como fuertes emisoras de partículas alfa.

Debido a que transportan una carga positiva doble ($3{,}20 \times 10^{-19}$ C), las partículas alfa producen fuertes efectos ionizantes. Su velocidad en el vacío puede ser tan alta como 16.000 km/seg, pero en el aire raramente superan la velocidad de algunos centímetros por segundo. Las partículas alfa no atraviesan una hoja de papel, una hoja de aluminio de 0,75 mm de

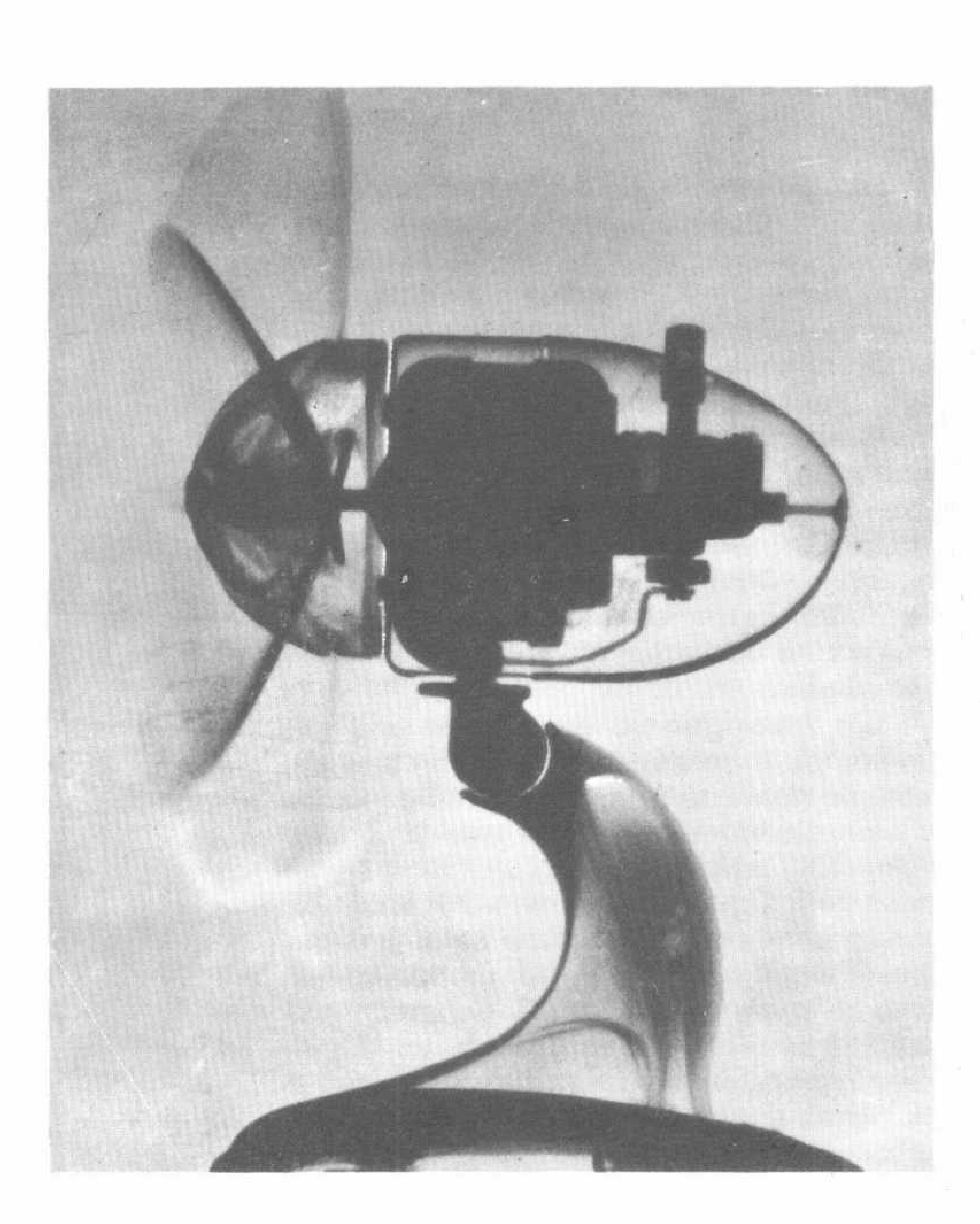


Fig. 2-13. Autorradiografía de un ventilador realizada empleando iridio 192 de alta actividad específica. Obsérvese el defecto en el soporte de acero.

espesor, o una capa de aire de 3,8 cm de profundidad. Los emisores alfa son biológicamente peligrosos al encontrarse en el *interior del cuerpo*. En el *etxerior* del cuerpo son algo menos peligrosos debido a su absorción por la epidermis, relativamente insensible.

Las *partículas beta* o electrones son lanzadas a altas velocidades desde los materiales radioactivos. Se desplazan unos pocos metros por el aire y son detenidas en forma efectiva por un trozo de madera de 2,5 cm. Producen una ionización bastante limitada, pero constituyen un peligro interno, debido a que cuando chocan contra un objeto generan rayos X. En los tubos al vacío, excitados mediante altos potenciales, las partículas beta alcanzan velocidades que se acercan a la de la luz. Su poder de penetración es aproximadamente cien veces mayor que el de las partículas alfa.

Los *rayos gamma* constituyen una radiación electromagnética de onda corta altamente penetrante cuya longitud de onda es aproximadamente 1/100 que la de los rayos X. También se originan en los núcleos de los radioelementos, acompañando ya sea a las emisiones alfa o beta. Los rayos gamma recoren varios metros en el aire, y para detenerlos es necesario un trozo grueso de concreto o plomo. Algunos rayos gamma pueden atravesar trozos de plomo de 10 cm, y en consecuencia se utilizan para tomar radiografías de fundiciones de metal grueso, opacas a los rayos X. El poder penetrante de los rayos gamma es aproximadamente 100 veces mayor que el de las partículas beta. Los rayos gamma pueden considerarse *fotones* de alta energía, o cuantos de radiación de alta frecuencia.

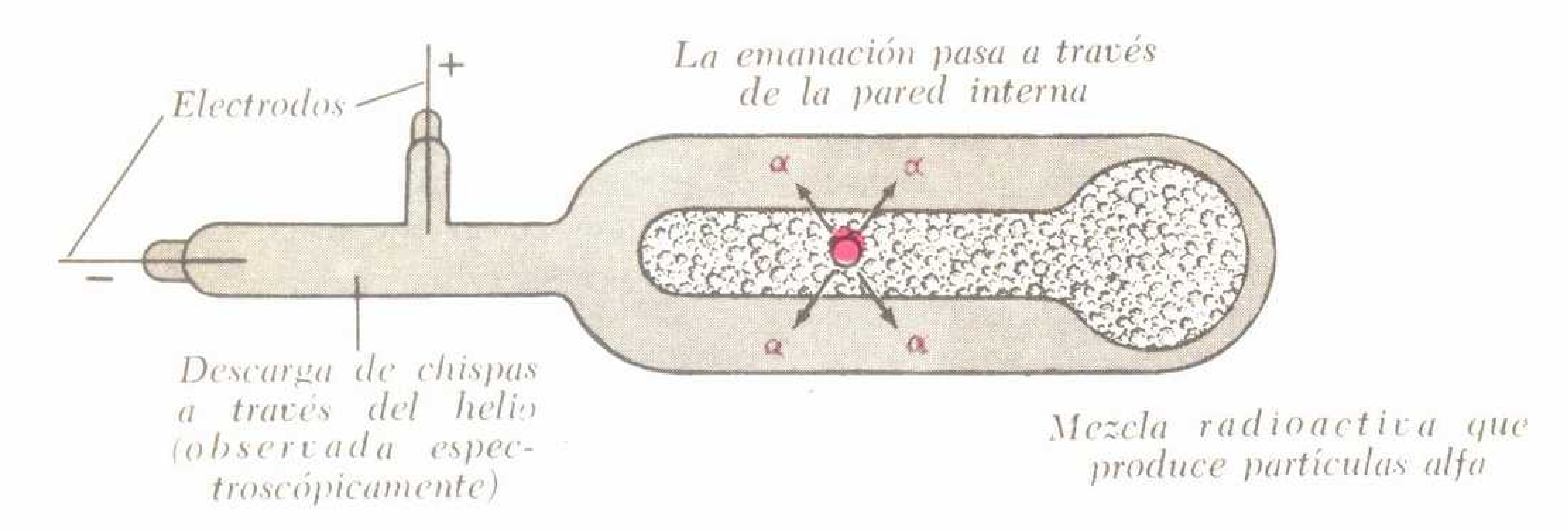


Fig. 2-14. Aparato de Rutherford para demostrar la identidad de las partículas alfa con los núcleos de helio

7 CONTADORES, DETECTORES Y REGISTRADORES DE EMISIONES

Es imposible observar partículas del tamaño de las alfa y beta, si bien *pueden*

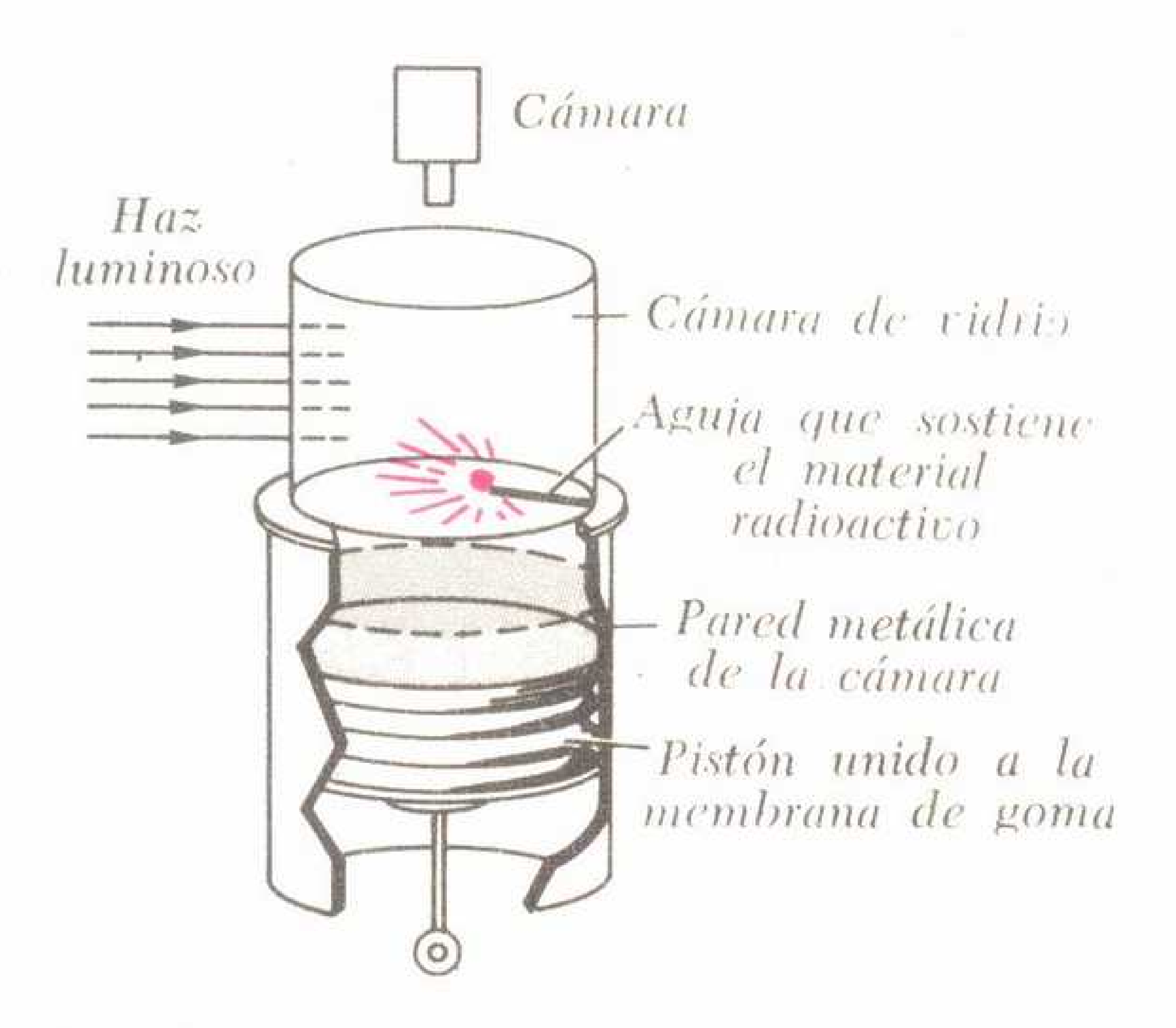


Fig. 2-15. Vista en despiece de una cámara de nube de Wilson.

detectarse y contarse realmente. El método más simple para "descubrir" partículas alfa es dejarlas chocar contra una *placa fotográfica* especialmente sensibilizada. Las partículas ionizantes desalojan a los electrones existentes en la emulsión produciendo una imagen latente que se revela mediante un agente reductor. Los trazos a menudo se extienden por toda la profundidad de la emulsión, necesitándose para efectuar la observación un microscopio binocular. Las partículas beta también pueden ser detectadas y registradas fotográficamente.

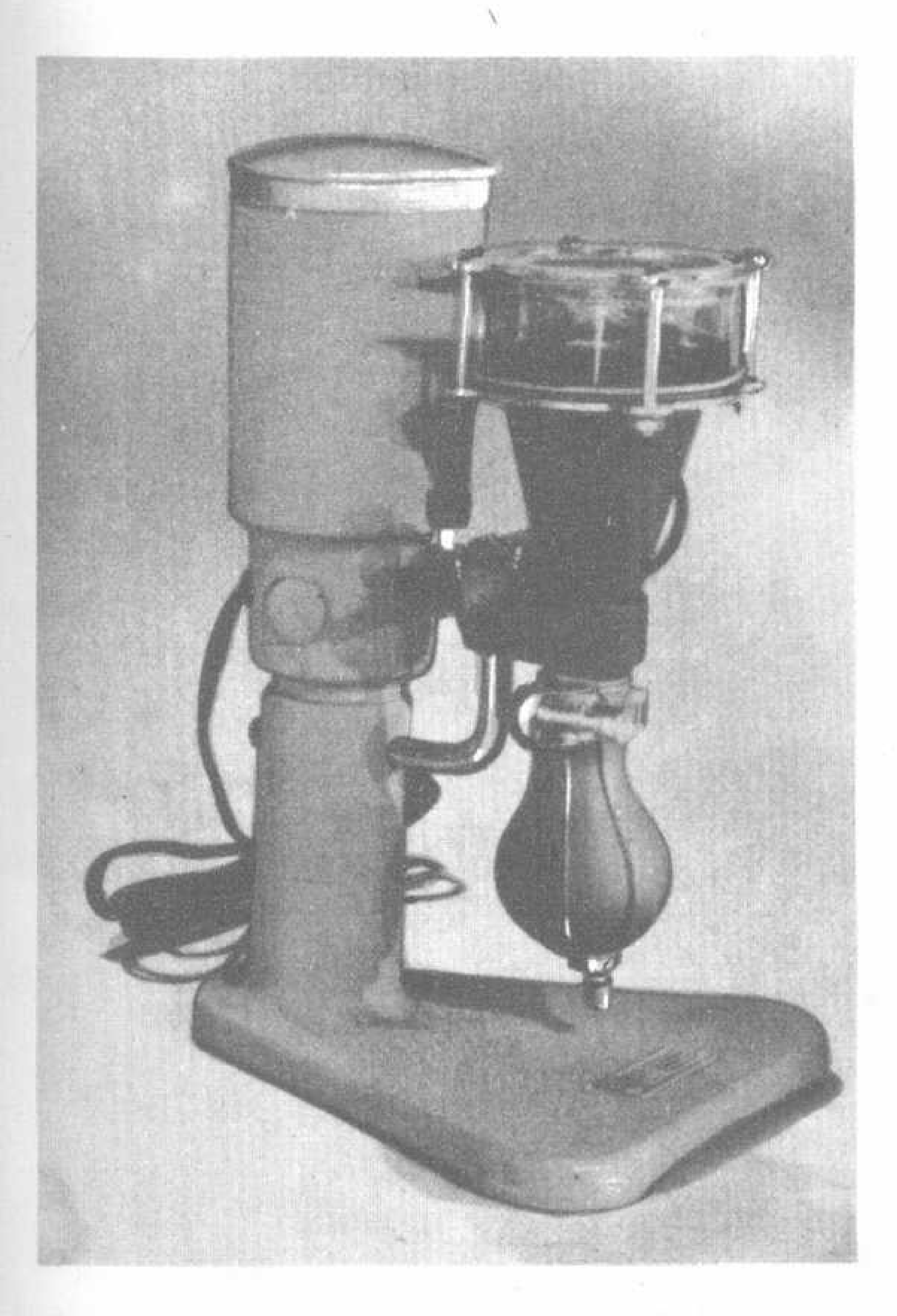


Fig. 2-16. Cámara de nube de Wilson.

La *cámara de nube*, inventada en 1911 por C. T. R. Wilson, es otro dispositivo para detectar partículas que, a diferencia de la placa fotográfica, generalmente debe ponerse en condiciones de funcionamiento antes de que pueda responder a una situación de origen nuclear. En realidad, la

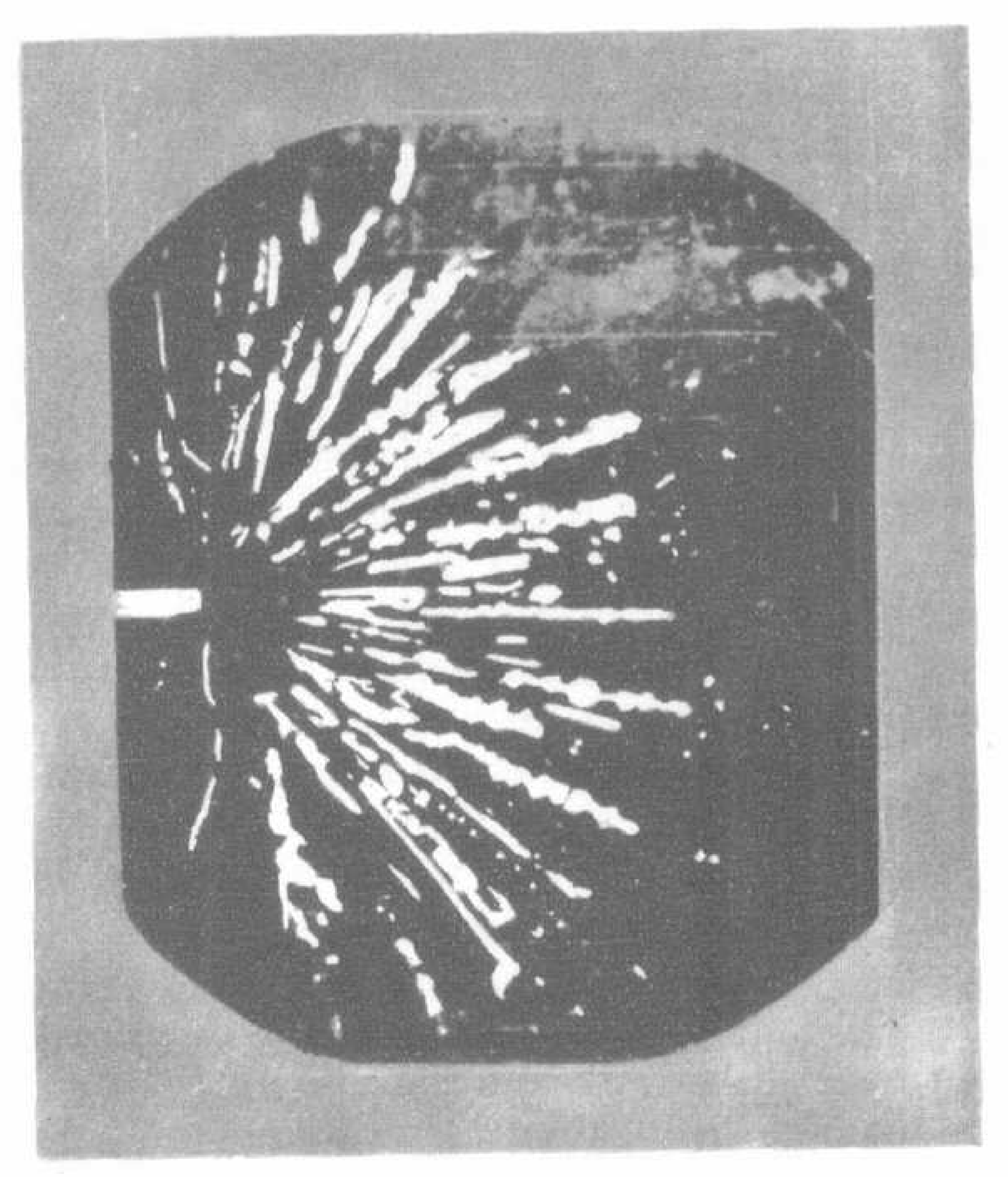


Fig. 2-17. Rastros nucleares.

cámara de nube utiliza el conjunto de iones que deja el desplazamiento de electrones, protones o partículas alfa móviles. Los iones se convierten en centros alrededor de los cuales se condensa el vapor existente en la cámara y de esa manera el recorrido de los mismos se hace visible.

En la fig. 2-15 se ilustra en despiece una cámara de nube y en la fig. 2-16 una forma totalmente modificada. La cámara propiamente dicha es el recipiente de vidrio, a través del cual se efectúan las observaciones. El espacio encerado contiene aire y vapor de agua saturado. En el interior del aparato se introduce un trozo de material radioactivo.

Si primero se comprime muy lentamente el vapor dejándolo luego expansionar rápidamente, se enfriará por debajo de su punto de rocío y precipitará la cantidad de humedad en exceso alrededor de algún *núcleo de condensación* que pueda estar pesente. Estos núcleos son los iones formados por las partículas alfa o beta emitidas por la muestra radioactiva. Como resultado, se aprecian (o la cámara puede fotografiar) una serie de trazos rectos, gruesos, de partículas alfa fuertemente io-

nizantes, o las finas trayectorias tortuosas dejadas por los electrones o partículas beta, menos activas (fig. 2-17).

Se ha diseñado una cámara de nube permanentemente sensible. En su parte superior se mantiene caliente una almohadilla saturada con alcohol isopropílico, mientras se enfría con hielo seco una placa metálica situada en la parte inferior. Esto produce un estado de sobresaturación continua del vapor en la zona cercana a la parte inferior de la cámara, con el resultado de que el instrumento está siempre en condiciones de responder al paso de radiaciones productoras de iones. En la fig. 2-18 se ilustra un equipo de laboratorio para observar y registrar los recorridos de partículas mediante una cámara de nube permanentemente sensible.

El conocido *espectroscopio de hojas* puede emplearse como sencillo detector de radiaciones que, sin embargo, no hace distinción entre las diversas clases de partículas que pasan por su proximidad. Primero se carga el electroscopio según una polaridad dada y luego se lo introduce en el campo de radioactividad. La entrada de partículas ionizantes al interior del recipiente de vidrio que contiene las hojas cargadas, neutraliza la carga existente en ellas, por lo que se juntan. La rapidez con que lo hacen mide la velocidad con que penetran las radiaciones ionizantes en el instrumento. La convergencia de las hojas es proporcional a la cantidad total de radiación a la cual se expone al instrumento.

Pospondremos hasta el Capítulo 3, las consideraciones respecto a otros contadores y detectores, tales como la cámara de ionización, el contador de Geiger-Müller, el contador de centelleo, la cámara de chispas, y la cámara de burbujas. Allí también explicaremos cómo se miden en realidad las *velocidades* de radiación, y las *cantidades totales* de radiación.

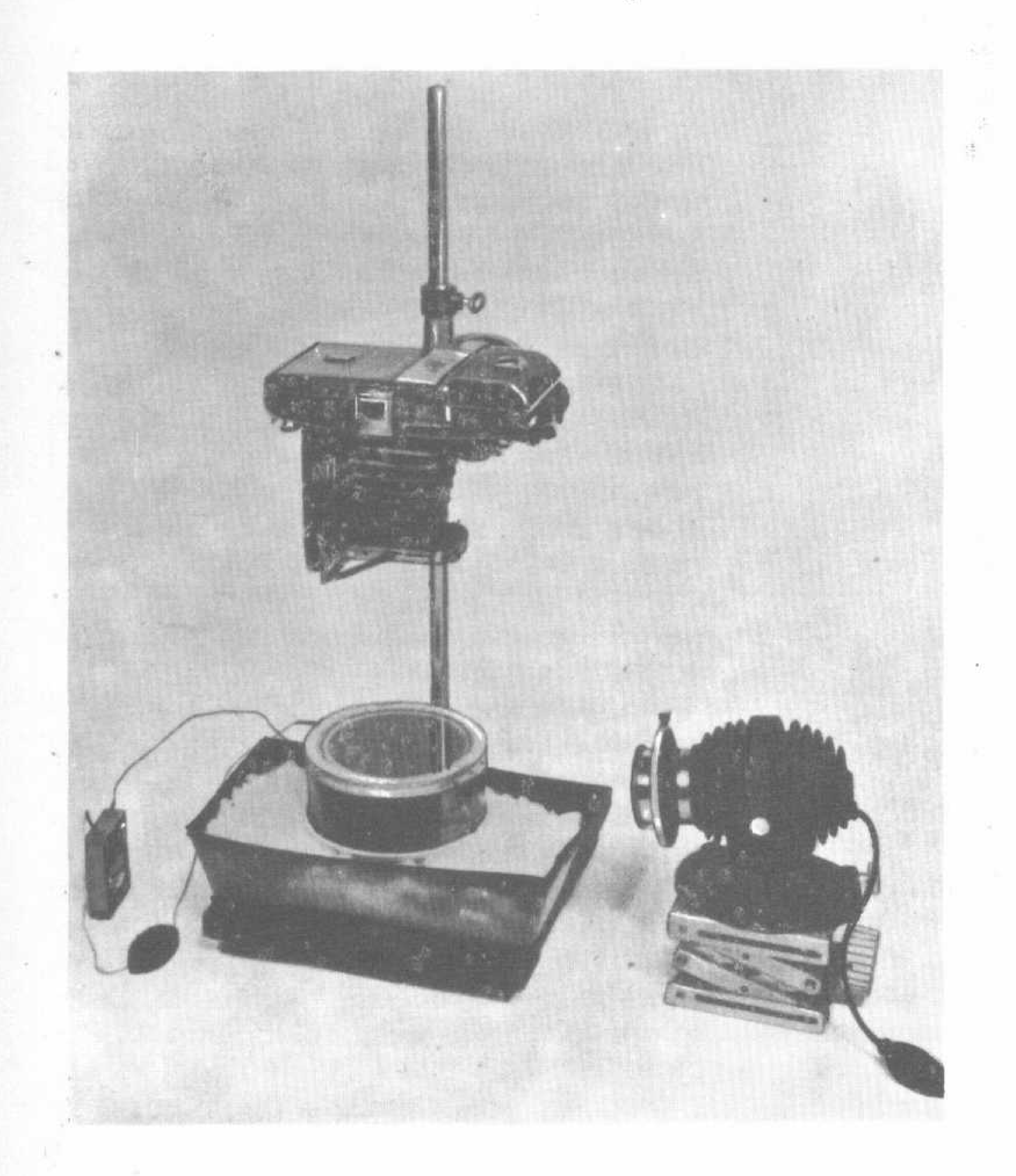


Fig. 2-18. Fotografiando rastros en la cámara de nubes.

8 "MODELOS" ATOMICOS *

Será ahora de interés averiguar como se "arma" un modelo de átomo en base a sus tres "bloques constructivos" fundamentales, protón, neutrón y electrón. El lector debe recordar que los modelos atómicos a lo sumo son "construcciones" mentales y que el átomo propiamente dicho no puede repesentarse mediante un juguete de laboratorio. La fig. 2-19 a lo sumo ofrece una interpretación altamente imaginativa

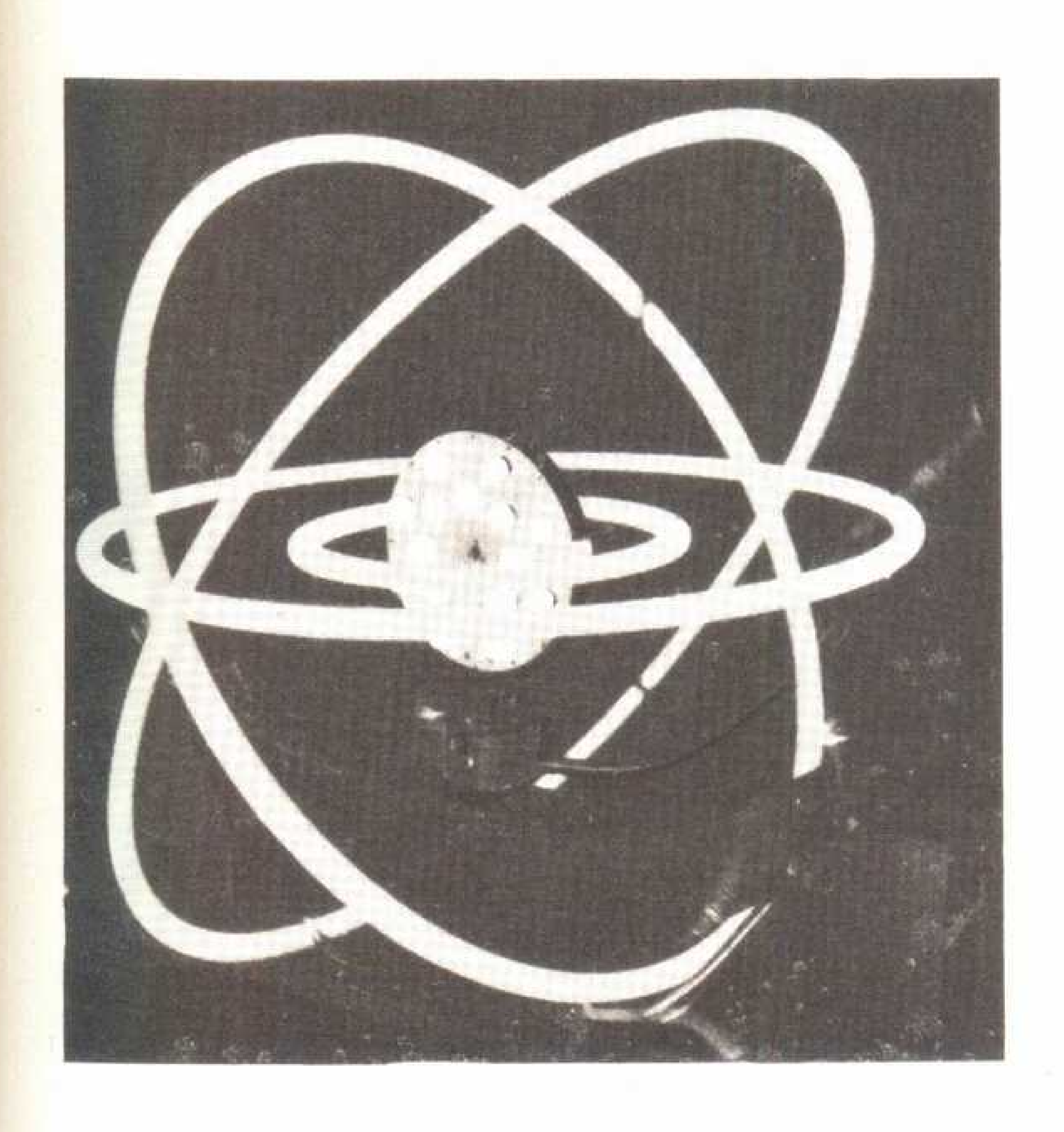


Fig. 2-19. "Modelo" tridimensional detallado de un átomo de oxígeno.

de la estructura de un átomo de oxígeno.

El primer átomo eléctrico fue representado por J. J. Thomson en 1898. Thomson dibujó al átomo como una esfera cargada positivamente de unos $2{,}5 \times 10^{-8}$ cm de diámetro, dentro de la cual se diseminaba una cantidad suficiente de electrones negativos para convertir al átomo en un conjunto eléctricamente neutro (fig. 2-20). Se comprobó que el átomo de Thomson no era satisfactorio debido al

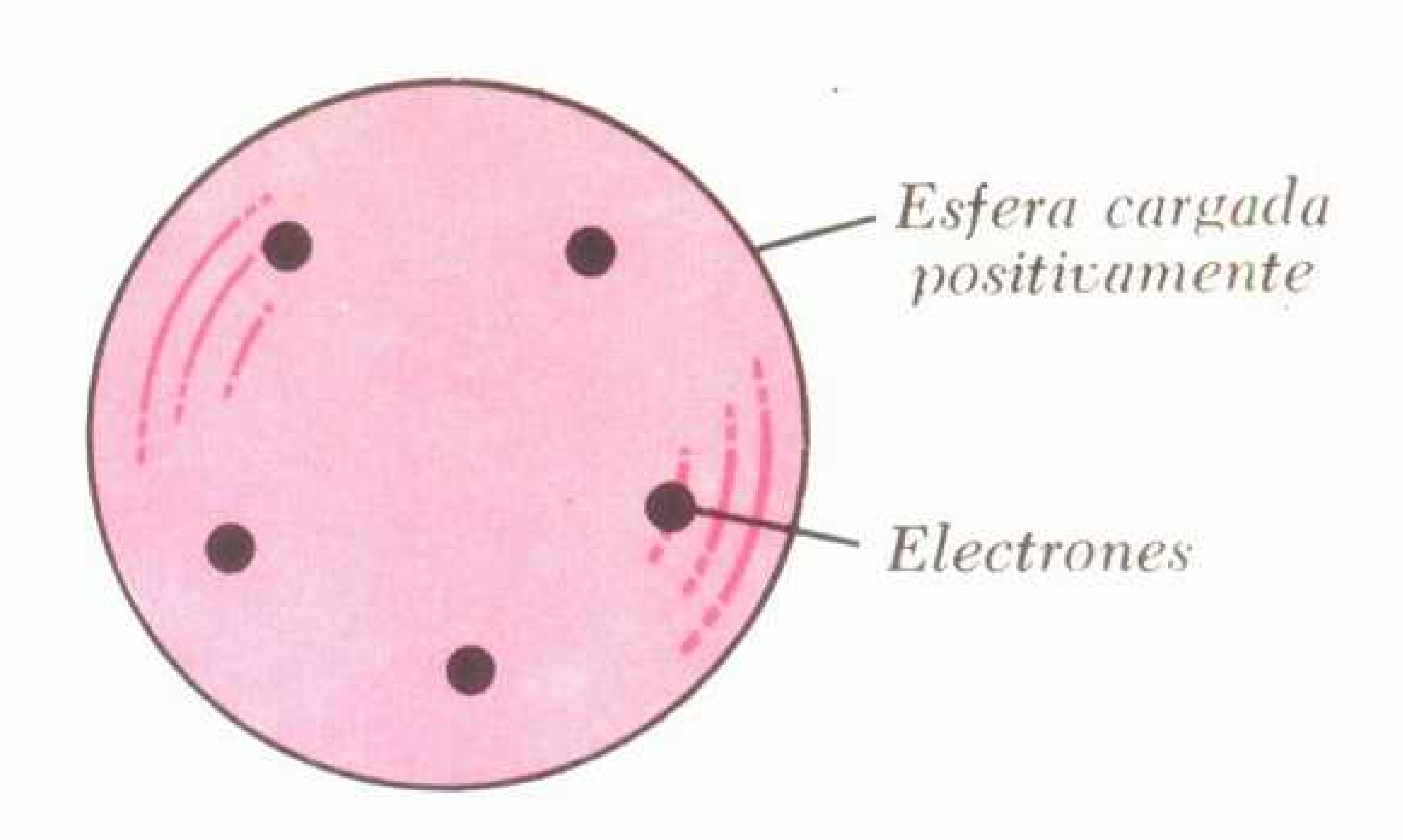


Fig. 2-20. Modelo atómico tipo "pastel de ciruelas" de Thomson.

carácter impreciso de la esfera de electrones que lo rodeaba y a la gran cantidad de electrones necesaria para explicar el peso del átomo.

Como respuesta a una situación experimental interesante se creó el *átomo nuclear* de Rutherford. Rutherford y Geiger hallaron que al dirigir una coriente de partículas alfa contra placas metálicas delgadas, se observaban desviaciones desusadamente grandes de algunas partícu-



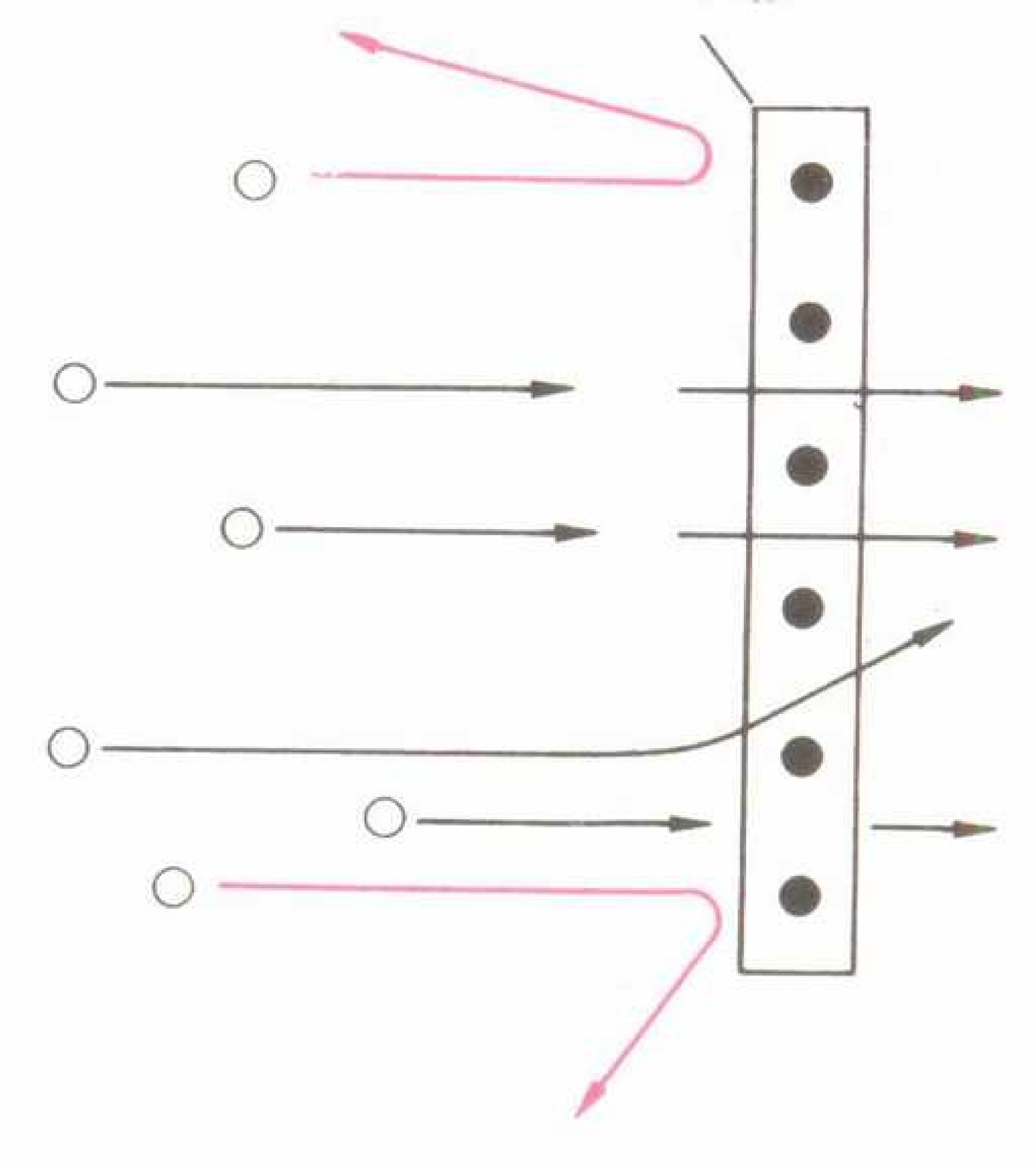
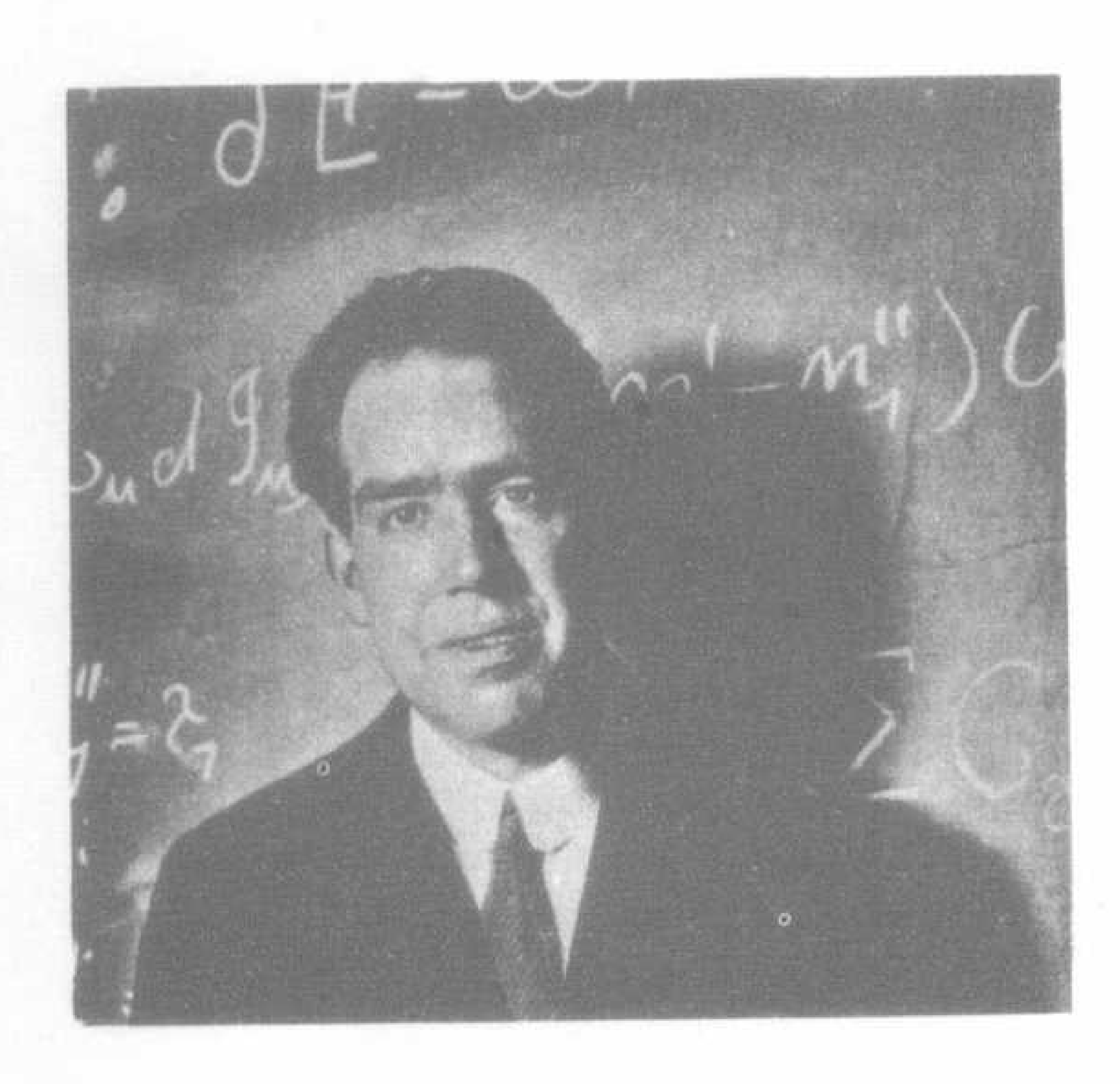


Fig. 2-21. El átomo de Rutherford, con sus cargas nucleares altamente concentradas (o), explica las grandes desviaciones de las partículas alfa (o) que chocan contra la película metálica.

---

* Ver también Apéndice.





NIELS BOHR (1885-1962)

las alfa (fig. 2-21) que llegaban hasta 180°. Esto sólo se podía explicar suponiendo que si una *carga* (nuclear) *central concentrada* se acercaba a una partícula alfa cargada en forma similar, podía en realidad invertir el movimiento de esta última. El átomo de Thomson con sus *pequeñas* cargas diseminadas no hubiera podido explicar, seguramente, una repulsión de esta magnitud.

Rutherford supuso que la carga positiva de un átomo estaba concentrada en un *núcleo* pequeño y compacto que tenía un radio de aproximadamente 1/10.000 del radio del átomo de hidrógeno. [El radio del núcleo se estima actualmente que es 10^{-13} cm, o 1 fermi (F).] Para equilibrar la carga positiva del núcleo, se supuso que una carga negativa igual estaba distribuida entre los electrones que rodean al núcleo. La masa del átomo era casi totalmente la del núcleo, de manera que no era ya más necesario suponer la existencia de una cantidad grande de electrones a fin de justificar esta masa.

En 1911, el átomo de Rutherford asumió la característica de un *sistema solar en miniatura* en el cual los electrones planetarios giraban alrededor del núcleo. Para esa fecha, el nuevo modelo atómico parecía que era estable y teóricamente satisfactorio, pero rápidamente se planteó una nueva dificultad. La teoría electromagnética exige que un electrón giratorio debe continuamente irradiar energía hacia el espacio circundante, compensando esta producción de energía girando en círculos cada vez más pequeños. En consecuencia, el electrón debe girar en forma de espiral hacia el interior y eventualmente debe caer dentro del núcleo. En consecuencia, el átomo planetario, *sin estos resguardos adicionales* es dinámicamente imposible.

En 1913, el físico danés Niels Bohr sugirió que un electrón, mientras está girando en una órbita cerrada —uno de los denominados *estados estacionarios* del átomo— en realidad *no* irradia energía. De acuerdo con Bohr, la radiación se produce sólo cuando el electrón salta de una órbita de estado estacionario estable, a una órbita de energía inferior o *interna*. Si el átomo absorbe energía, uno o varios de sus electrones saltan hacia una órbita de estado estacionario de energía superior o *externa. Mientras ocupan una de las órbitas cerradas* "permisible", *los electrones ni irradian ni absorben energía.* En la fig. 2-22 se ilustra en forma esquemática lo expresado por Bohr.

Bohr enriqueció su modelo atómico mediante las consideraciones de la *teoría cuántica*, representando los procesos de radiación y absorción de energía como de carácter *discontinuo* o *corpuscular.* Se comprobó que el átomo de Bohr propuesto en el año 1913 era técnicamente superior al modelo propuesto por Rutherford.

El átomo de Bohr y la versión posterior de Sommerfeld, aun sirven en forma satisfactoria para las finalidades de un curso de introducción a la física. Continuaremos empleándolo en las situaciones atómicas simples, teniendo en cuenta que en los casos en que existan intercambios de energía, tales como en las fotocélulas, el tubo de rayos X o la lámpara fluorescente, la explicación se hará en base a los saltos de electrones, estados estacionarios y excitados, etc. En la actualidad, ya no se utilizan más ni la idea de las partículas discretas que da lugar a ondas, ni los modelos mecánicos (ver apéndice).

9 ESTRUCTURA DEL NUCLEO *

Consideremos ahora como la imagen del núcleo propiamente dicho ha cambiado desde una partícula *homogénea* positivamente cargada hacia otra compuesta por un grupo de protones y neutrones que, tal como creemos en la actualidad, constituye el "corazón" de cada átomo salvo en el caso del hidrógeno simple.

Como primera medida debemos considerar el significado de las expresiones *masa atómica* (*A*) y *número atómico* (*Z*). La primera significa la masa relativa del átomo de un elemento químico expresada en unidades de masa atómica. Así, la masa atómica del hidrógeno es 1,08, la del calcio 40,08, la del hierro 55,85, la del platino 195,09, etc, calculadas todas en base al patrón de masa atómica recientemente aceptado e igual a 12 para cierto isótopo del carbono. El número atómico es el orden numérico asignado a los elementos químicos en la tabla periódica, ordenados sobre la base de su carga nuclear positiva o número de protones en el núcleo (o electrones existentes en el exterior del núcleo). La idea de los números atómicos fue propuesta en 1913 por el físico inglés H. G. J. Moseley que asignó el número 1 al hidrógeno, 2 al helio, 3 al litio, etc.

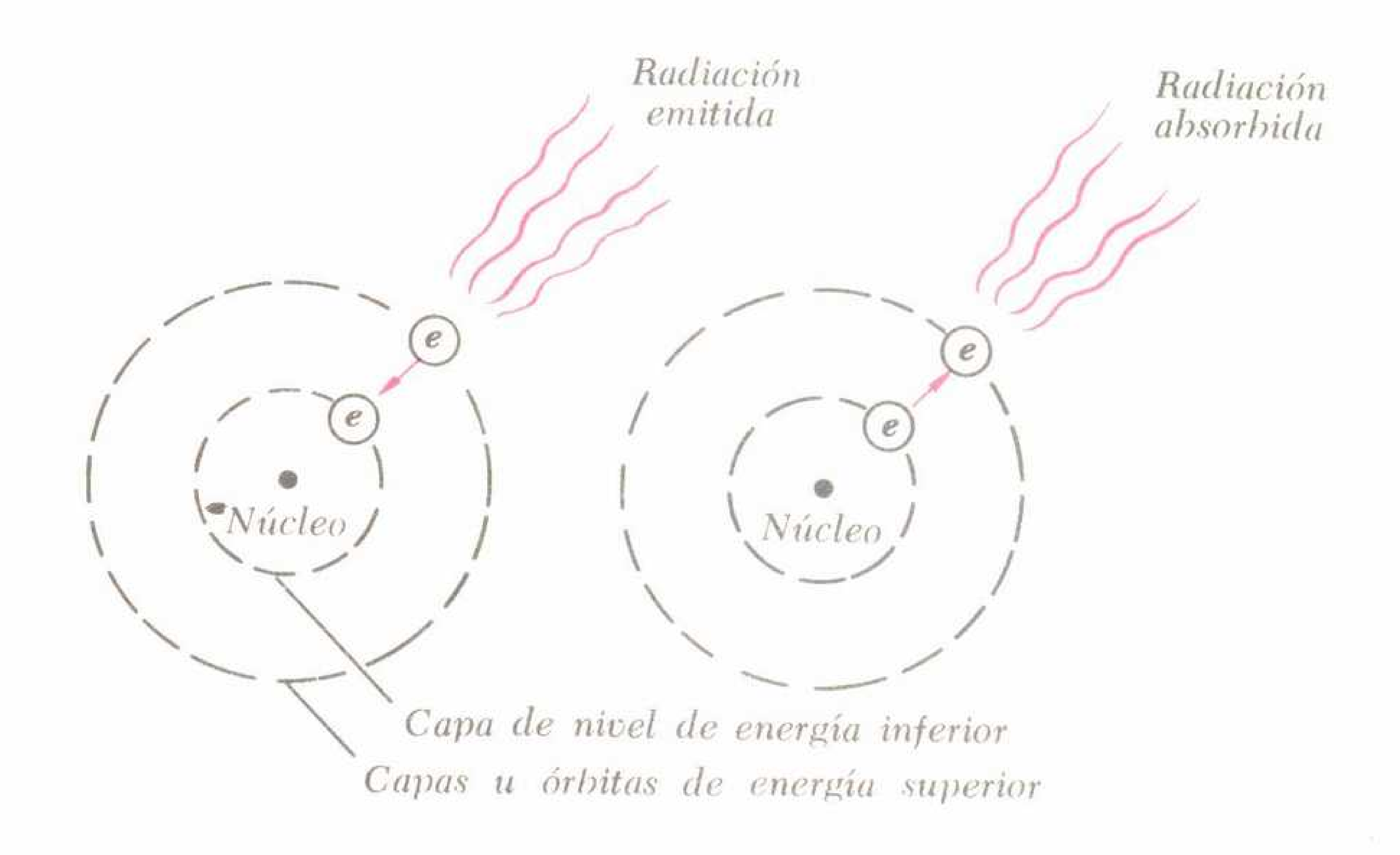


Fig. 2-22. Un átomo irradia energía cuando uno o varios electrones saltan de una capa de energía superior a otra de energía inferior. Cuando un átomo absorbe energía radiante proveniente de una fuente de suministro externa, sus electrones saltan a las capas de energía superior. No existe intercambio de energía si el electrón giratorio está confinado en alguna de las órbitas no radiantes "permisibles".

Al designar a los elementos químicos escribimos el número atómico en la parte izquierda inferior y la masa atómica en la parte izquierda superior. Así, el símbolo nuclear de algún elemento *x*, lleva un subíndice apropiado Z y un índice superior A, tal como se indica mediante ${}^{A}_{Z}x$.

Supongamos, tal como se hizo primeramente, que el núcleo de un átomo está compuesto sólo por protones. Consideremos el átomo de sodio (número atómico Z, igual a 11, y masa atómica, *A*, aproximadamente igual a 23). Si suponemos que 11 es tanto el número de protones como el de electrones extranucleares o planetarios, satisfaremos los requisitos

* Ver también Capítulo 3.

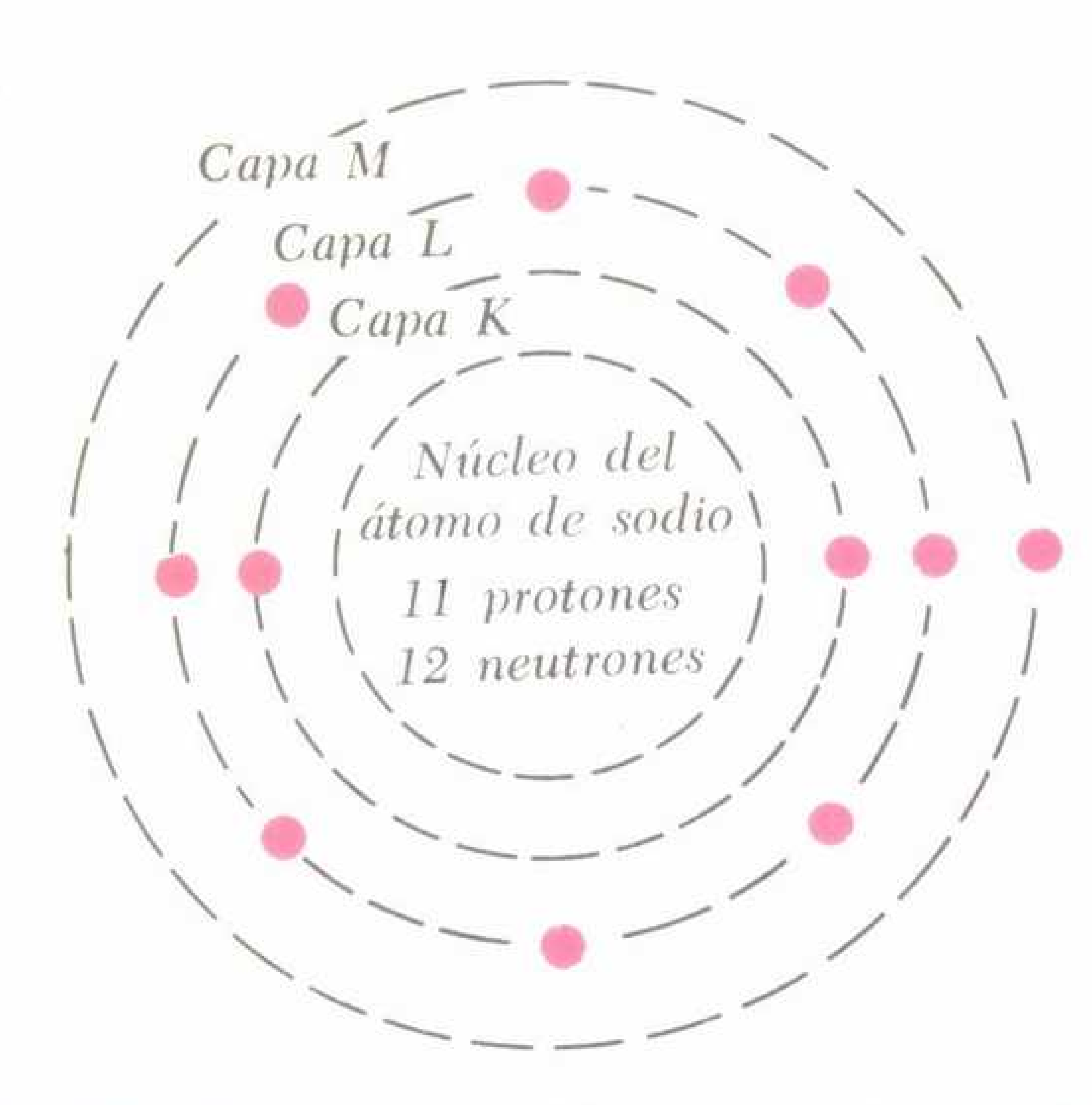


Fig. 2-23. Esquema simplificado del átomo de sodio. Los trazos negros representan electrones. En el interior de una capa puede existir más de una órbita electrónica.

eléctricos, pero dejaremos al modelo en una situación en la cual no puede cumplir con el requisito de *masa,* $A = 23$. Si, por otra parte, aceptamos que 23 es el número de protones existentes en el núcleo (para ganar la masa necesaria), automáticamente debemos cambiar por 23 la cantidad de electrones extranucleares, lo cual alteraría entonces la situación del elemento en la tabla periódica. Evidentemente, se hace necesario introducir otra partícula en el núcleo, es decir, el *neutrón* ($^{1}_{0}n$) con carga 0 y masa 1 (del cual ya hemos hablado anteriormente). Esta es la idea propuesta en 1932 por W. Heisenberg, que demostró matemáticamente que se podría probar que es particularmente estable el núcleo compuesto por protones y neutrones.

Por lo tanto, representamos al núcleo de un átomo de sodio en la suposición de que está compuesto por 11 protones y (23-11) o sea 12 neutrones, cada uno con masa iguala 1, y en consecuencia una masa total igual a 23. Para equilibrar eléctricamente al átomo, colocamos 11 electrones en el exterior del núcleo, a saber: 2 en la *capa K* o primera, 8 en la *capa L* o segunda, y 1 en la *capa M* o tercera. (Por el momento, no tenemos en cuenta las *subcapas* de que están compuestas las capas). En la fig. 2-23 se representa un modelo planetario simplificado del átomo de sodio ($^{23}_{11}Na$).

Consideremos un elemento más, por ejemplo, el potasio, K. Su masa atómica es 39 y su número atómico 19. Simbolizamos al elemento $^{39}_{19}K$, donde el subíndice 19 es el valor de Z y el índice superior 39 el valor de *A*. Según esto, el núcleo del átomo de potasio contiene 19 protones y (39 — 19) o sea 20 neutrones, contribuyendo todos ellos para obtener las 39 unidades de masa requeridas. Diecinueve electrones están dispuesto en la parte exterior del núcleo: 2 en la capa *K*, 8 en la *L*, 8 en la *M* y 1 en la *N*. Las diecinueve cargas negativas unidad suministradas por estos electrones neutralizan las diecinueve cargas positivas transportadas por los protones. Así, mediante la clase, número y distribución supuesta de las partículas subatómicas, se alcanzan en forma total la neutralidad eléctrica, la masa correcta y valencia química apropiada. El lector está en condiciones de bosquejar por si mismo el "modelo" del átomo de potasio.

En resumen, observamos que *A* o cantidad de masa, es la suma de protones y neutrones en el núcleo. *Z* o número atómico, es la cantidad de protones en el núcleo, y también la cantidad de electrones orbitales. La cantidad de neutrones en el núcleo es ($A — Z$). Es interesante hacer notar que la relación de la cantidad de neutrones a la cantidad de protones es, en los primeros veinte elementos, muy próxima a 1. La relación aumenta a medida que se va desde los elementos livianos a los pesados.

10 ISOTOPOS

A partir de la descripción precedente, podría parecer que la masa atómica *A* siempre es un número entero y que simplemente necesitamos ajustar la cantidad de protones y neutrones en el núcleo para verificar la masa en cuestión. En realidad muchos elementos tienen masas atómicas

que se apartan de los números enteros simples. Así, la masa atómica del hidrógeno es 1,008, al del litio 6,94, y la del cloro 35,45. (Las masas atómicas son masas *relativas*, calculadas tomando como patrón la masa del átomo de carbono, igual a 12.) El problema que se nos plantea inmediatamente es si necesitamos fracciones de nuestras tres partículas subatómicas fundamentales para confeccionar estas estructuras complicadas.

Afortunadamente, no lo hacemos. La explicación de las masas atómicas fraccionarias se halla en el hecho de que muchos elementos están compuestos por átomos de *masas diferentes*, pero que transportan la misma carga y en consecuencia son *químicamente idénticos*. Así, el neón ($Z = 10$) es una mezcla de átomos que se reúnen en forma natural y que tienen 20, 21 y 22 unidades de masa. Los núcleos de la primer variedad están compuestos por 10 protones y 10 neutrones, los de la segunda por 10 protones y 11 neutrones, y los de la tercera por 10 protones y 12 neutrones. A estas formas del neón las denominamos *isótopos*, que significa que son físicamente diferentes (tienen masas diferes) pero son químicamente idénticos (transportan la misma cantidad de protones en el núcleo y de electrones en el exterior del mismo). La fig. 2-24 ilustra en forma esquemática la estructura de los tres isótopos, ${}^{20}_{10}Ne$, ${}^{21}_{10}Ne$, ${}^{22}_{10}Ne$. Estos isótopos están presentes en forma natural en proporciones tales (90,5 %, 0,3 % y 9,2 %, respectivamente) como para formar un *promedio en peso* de 20,18 para la masa del átomo de neón "compuesto".

En forma similar, existen dos isótopos del litio, el ${}^{6}_{3}Li$ y el ${}^{7}_{3}Li$ bastante más abundante. El promedio en peso de las masas atómicas es de 6,94. El hidrógeno común es una mezcla del ${}^{1}_{1}H$ muy abundante y del ${}^{2}_{1}H$ extremadamente raro. Este último, que existe sólo en una proporción de aproximadamente una parte en siete mil se conoce como hidrógeno "pesado", o *deuterio*. Existe un nuevo isótopo radioactivo del hidrógeno fabricado por el hombre, conocido como *tritio* y simbolizado ${}^{3}_{1}H$, que tiene su propia masa, pero que comparte con las otras formas de hidrógeno su carácter químico común.

Se ve así que los isótopos están caracterizados por la misma Z (números atómicos, cargas nucleares, cargas extranucleares ,cantidades de protones y electrones orbitales), pero varían en cuanto a su A (masas atómicas, cantidades de neutrones en sus núcleos). Los isótopos pueden clasificarse como *estables*, *radioactivos en forma natural*, y *radioactivos en forma artificial*. En el Capítulo 3 hablaremos mucho más respecto al carácter de los isótopos y sus aplicaciones.

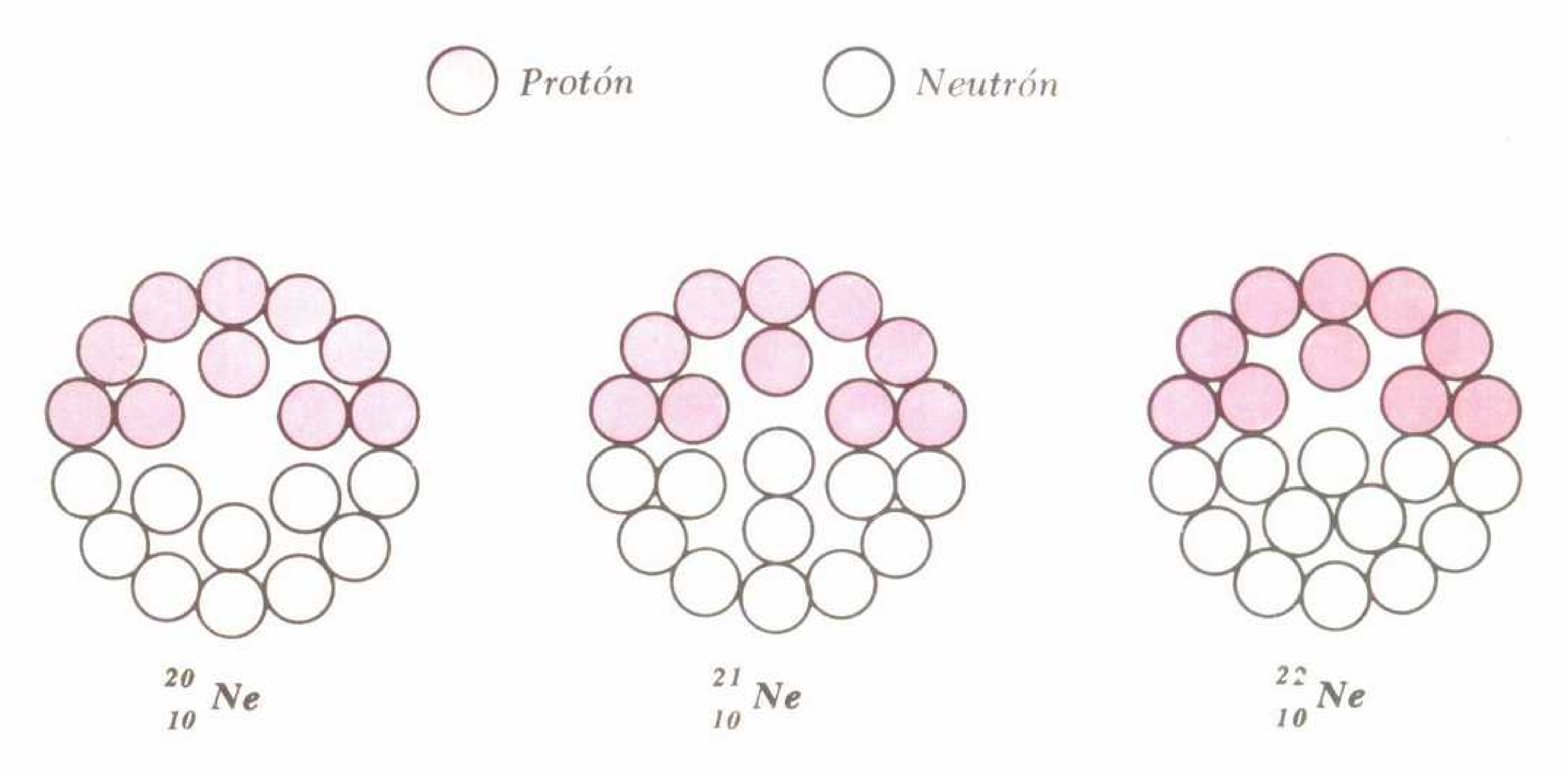


Fig. 2-24. Forma de simbolizar la estructura del núcleo de los tres isótopos del neón. Diez electrones giran alrededor de cada uno de estos núcleos.

11 SEPARACION DE LOS ISOTOPOS

Los átomos del uranio, origen de la energía atómica, son mezclas de tres isótopos: $^{238}_{92}U$ (99,28 %), $^{235}_{92}U$ (0,71 %) y $^{234}_{92}U$ (0,01 %). De ellos, sólo el $^{235}_{92}U$, que mezcla de moléculas de hexafluoruro de uranio (F_6U) choque con una barrera provista de orificios de tamaño apropiado, se producirá una *difusión diferencial* y el gas que pasa a través de la barrera se enriquecerá en componentes más livianos. Si en-

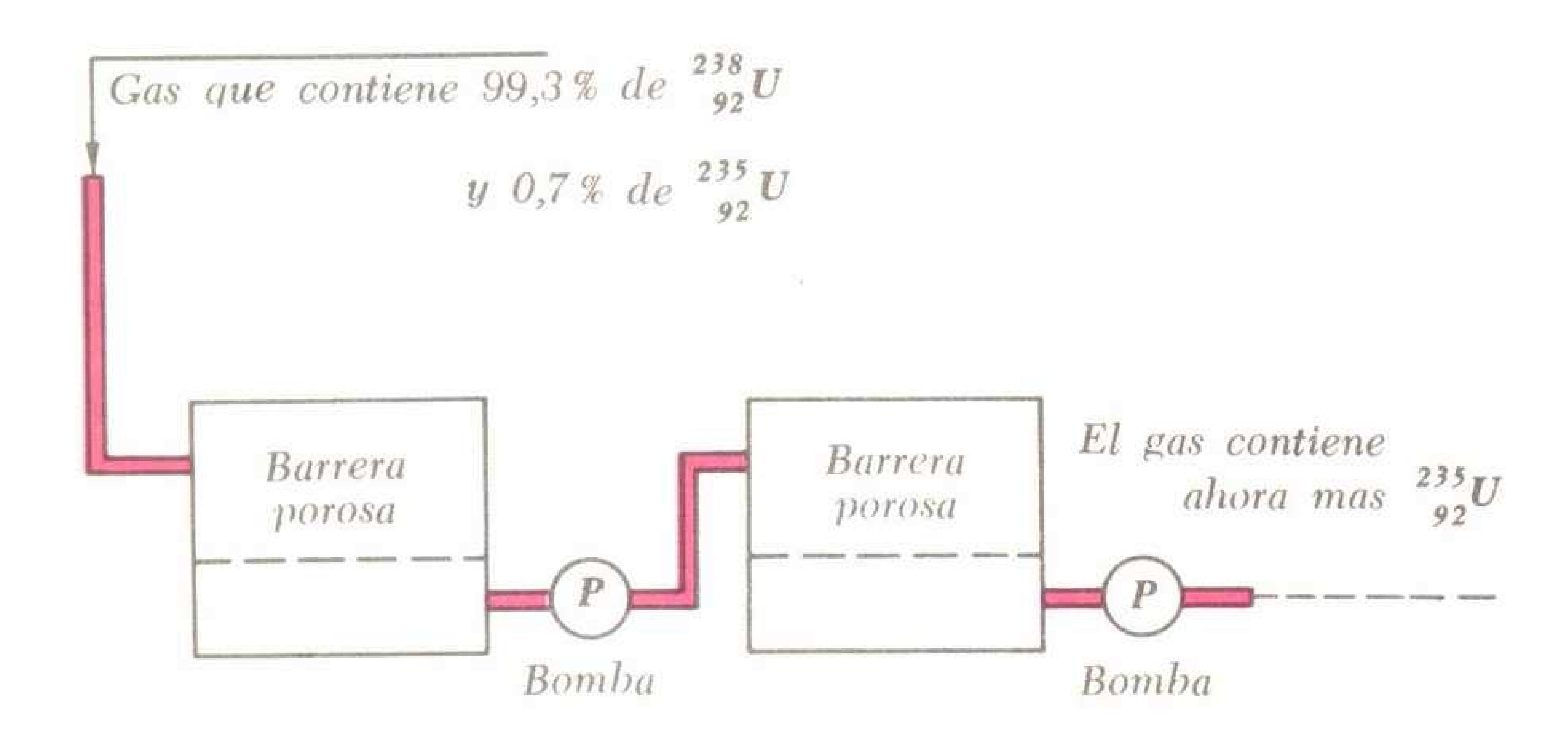


Fig. 2-25. Diagrama del método de difusión gaseosa de separación de isótopos. El proceso origina un enriquecimiento progresivo del gas en $^{235}_{92}$U (componente más liviano).

está presente en una proporción de 1 parte en 140, puede mantener una reacción en cadena. En consecuencia es importante poder separar al U^{235} altamente fisionable del bastante abundante U^{238} que sólo captura neutrones, pero que por si mismo no experimenta fisión. Evidentemente, la separación química es imposible, debido a que todas las formas del uranio son químicamente idénticas.

Entre los métodos *físicos* que con más éxito se han empleado para la separación del U^{235} puede citarse el de *difusión gaseosa,* que se basa en la diferente velocidad de desplazamiento de los compuestos gaseosos de los isótopos a través de membranas porosas. Si se permite que una

tonces se hace pasar la mezcla a través de otra barrera (proceso denominado *en cascada*) se producirá otro nuevo enriquecimiento lográndose una mayor separación total de los isótopos.

Se continúa el proceso hasta que se obtiene el *factor de separación* deseado. La fig. 2-25 ilustra el principio básico del método de difusión de separación de isótopos.

La separación por difusión gaseosa del U^{235} de su compañero indeseable el U^{238} fue realizada en Oak Ridge, Tennessee (EE.UU. de Norteamérica) cuando se llevó a cabo la producción de la bomba atómica. También se ensayaron con éxito otros métodos para separar este isótopo.

REPASO

Preguntas

1 ¿De qué manera los descubrimientos de Becquerel y de los esposos Curie atrajeron la atención respecto a la naturaleza compleja del átomo?
2 ¿Por qué se debe someter a un vacío parcial un tubo de descarga de gases antes de que éste comience a conducir corriente eléctrica? ¿Por qué cesa de conducir cuando el vacío es casi total?
3 ¿Qué se entiende mediante la relación e/m? ¿Por qué esta relación es menor (aproximadamente la mitad) para una partícula alfa que para un protón?
4 Si el símbolo para un electrón es ${}_{-1}^{0}e$: ¿Cuál es el símbolo para un positrón?
5 ¿Cuál es el símbolo nuclear para el neutrón?
6 El núcleo de hidrógeno "pesado" o deuterio se llama *deuterón*. ¿Cuál es el símbolo nuclear para esta partícula?
7 ¿Cuál es el símbolo nuclear para el núcleo de tritio, es decir, el *tritón*?
8 ¿Cuál es la causa de que la proximidad de una sal radioactiva haga que se junten las hojas de un electroscopio cargado?
9 ¿Cuál es la naturaleza de las partículas alfa, las partículas beta, y los rayos gamma? Exprese los dos primeros en símbolos nucleares. ¿Por qué no se pueden expresar de esa manera los rayos gamma?
10 ¿Qué se entiende por vida media de un elemento radioactivo? ¿Por qué los radiólogos consideran a un elemento radioactivo de vida corta de actividad específica dada, más seguro de manipular que uno de vida larga?
11 Compare las partículas alfa y las partículas beta con respecto (*a*) poder ionizante, (*b*) grado de desplazamiento en el aire, (*c*) velocidad en el vacío.
12 ¿Qué se entiende por *autorradiografía*? ¿Cómo se produce?
13 ¿Qué se entiende por *radiografía gamma*? ¿Dónde se la emplea?
14 Explique cómo se forman los trazos en la cámara de nube de Wilson. ¿De qué manera se puede distinguir entre los trazos producidos por las partículas alfa y beta, productoras de iones?
15 ¿Qué es lo que en realidad se ve en la cámara de nube: partículas subatómicas, iones o una serie de gotitas de agua?
16 ¿Qué hechos experimentales condujeron al rechazo del modelo atómico de Thomson? ¿De qué manera el modelo de Rutherford concordaba con la situación?
17 Explique en base a consideraciones cuánticas simples cómo un átomo absorbe e irradia energía.
18 El azufre (S) tiene una masa atómica igual a 32 y un número atómico igual a 16. Dibuje un "modelo" adecuado para el átomo de azufre.
19 Bajo condiciones comunes, se dice que el *argón*, ${}_{18}^{40}A$, es un elemento *inerte*. Explique esto en términos de su estructura atómica.
20 Dé dos formas de un elemento químico, uno representado mediante el símbolo ${}_{Z}^{A}M$, y el otro mediante el símbolo ${}_{Z}^{A+1}M$. ¿Qué nombre se da a estas dos formas?
21 ¿En la pregunta anterior, los elementos difieren física y químicamente? Explíquelo.
22 ¿A qué atribuye Ud. el alto poder de penetración de un neutrón cuando choca contra un objetivo atómico?

Problemas

1 Dada una vida media de T igual a 10 días: ¿Qué fracción del número primitivo de átomos estará presente después de un lapso de 30 días? ¿Puede señalar Ud. los átomos que permanecerán?

2 Un radioelemento $^{A}_{Z}x$ se desintegra en una etapa única formándose $^{A-4}_{Z-2}y$. ¿Qué partícula nuclear fue emitida durante esta transformación?

3 Suponga un elemento radioactivo $^{A}_{Z}x$. Si el elemento es un emisor beta: ¿cuál es el símbolo nuclear para el primer producto de su desintegración?

4 El torio $^{232}_{90}Th$, emite una partícula alfa, convirtiéndose en radio (Ra). Escriba el símbolo nuclear para el producto de la descomposición.

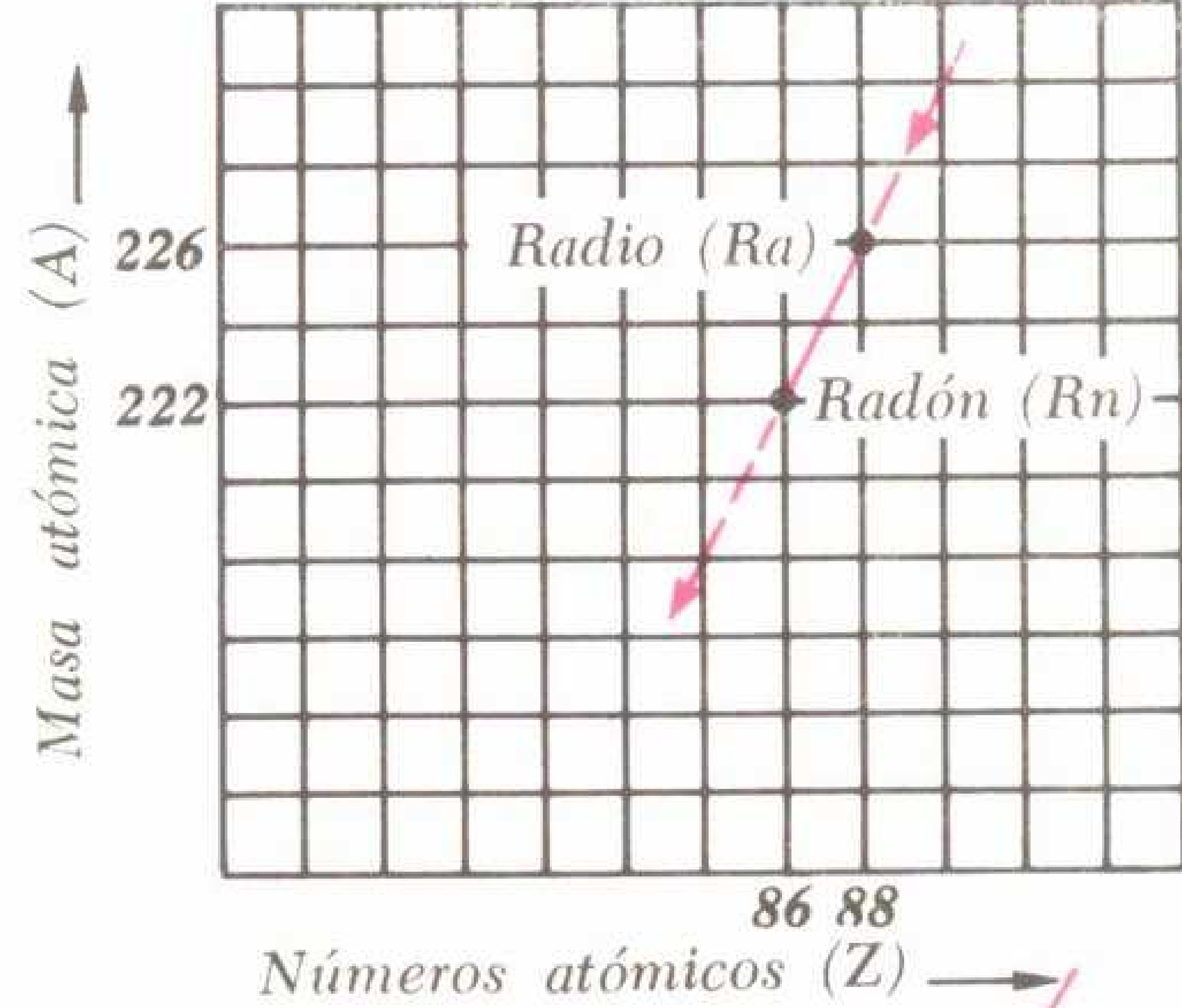
5 El radio formado en la desintegración precedente (Problema 4) emite ahora una partícula beta, convirtiéndola en actinio (Ac). Escriba el símbolo nuclear para este producto.

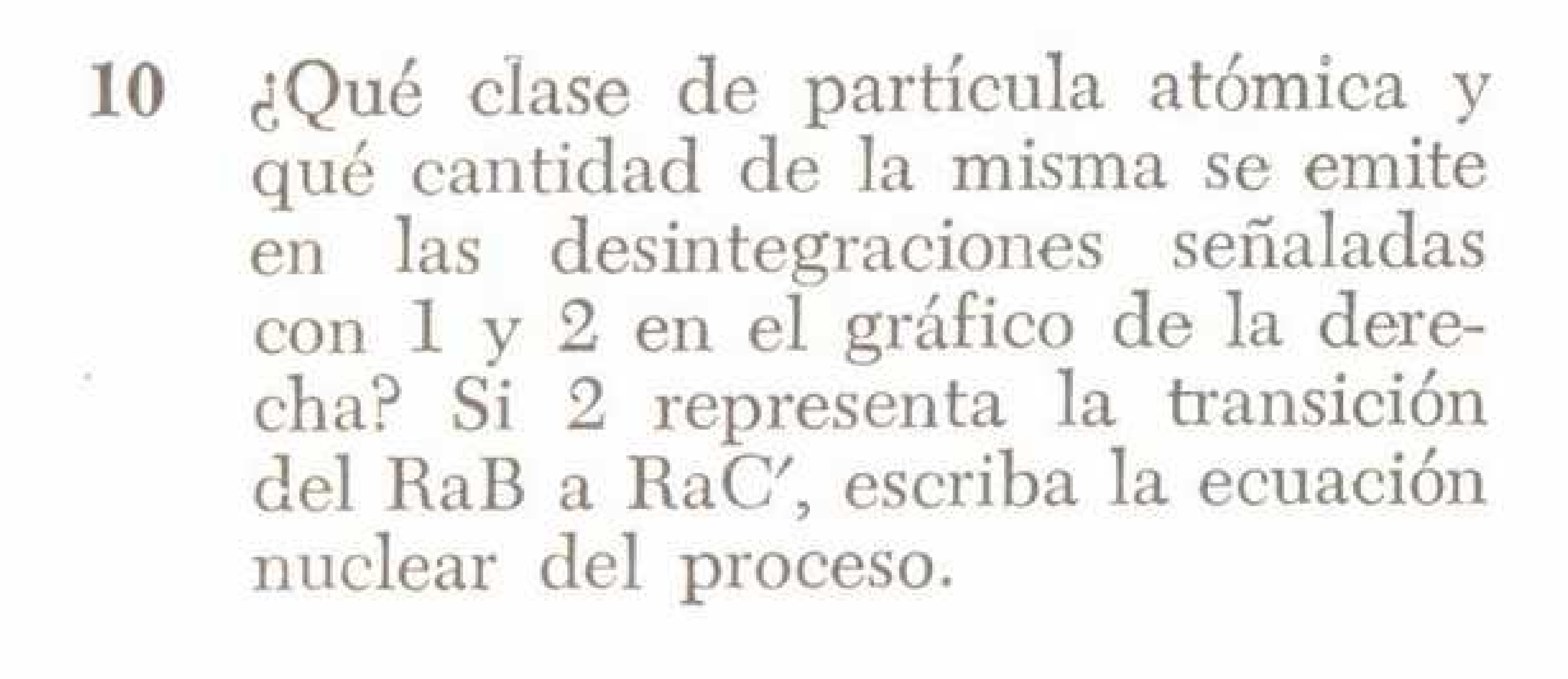
6 El símbolo nuclear del iodo es $^{127}_{53}I$. ¿Cuántos protones existen en el núcleo del átomo de iodo? ¿Cuántos neutrones? ¿Cuántos electrones se hallan en todas las capas extranucleares?

7 Un elemento radioactivo emite partículas alfa. Por cada partícula alfa perdida: ¿Cómo varía la masa atómica del elemento? ¿Su número atómico?

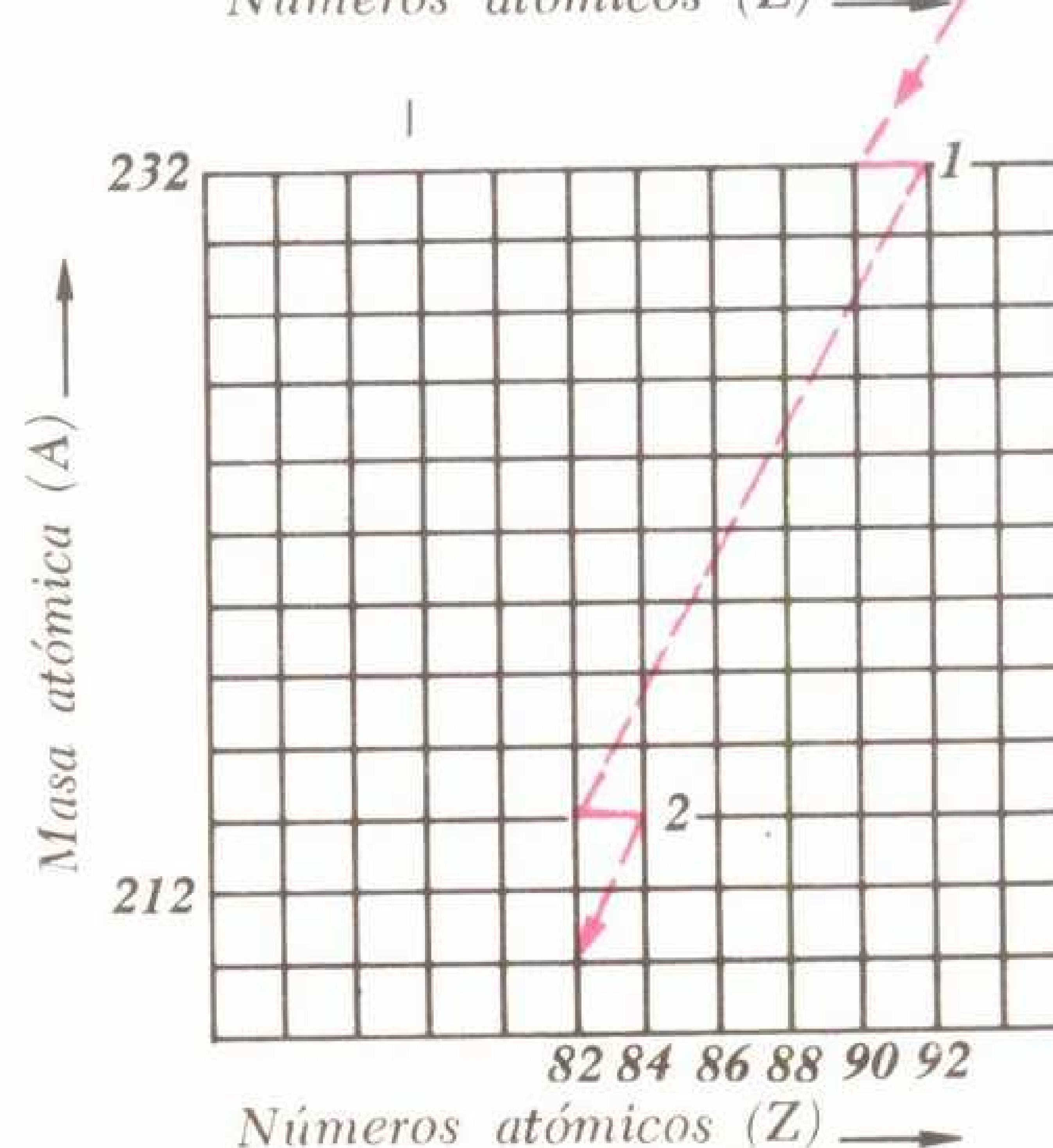
8 Un elemento radioactivo emite partículas beta. Por cada partícula beta perdida: ¿Qué variación se produce en la masa atómica del elemento? ¿En su número atómico?

9 En el gráfico de la derecha se ilustra parte de la curva de desintegración del uranio. Los números de masa se miden en el eje vertical y los números atómicos en el horizontal. Escriba la ecuación nuclear para la transformación del radio (Ra) en radón (Rn).





10 ¿Qué clase de partícula atómica y qué cantidad de la misma se emite en las desintegraciones señaladas con 1 y 2 en el gráfico de la derecha? Si 2 representa la transición del RaB a RaC′, escriba la ecuación nuclear del proceso.



ENERGIA NUCLEAR

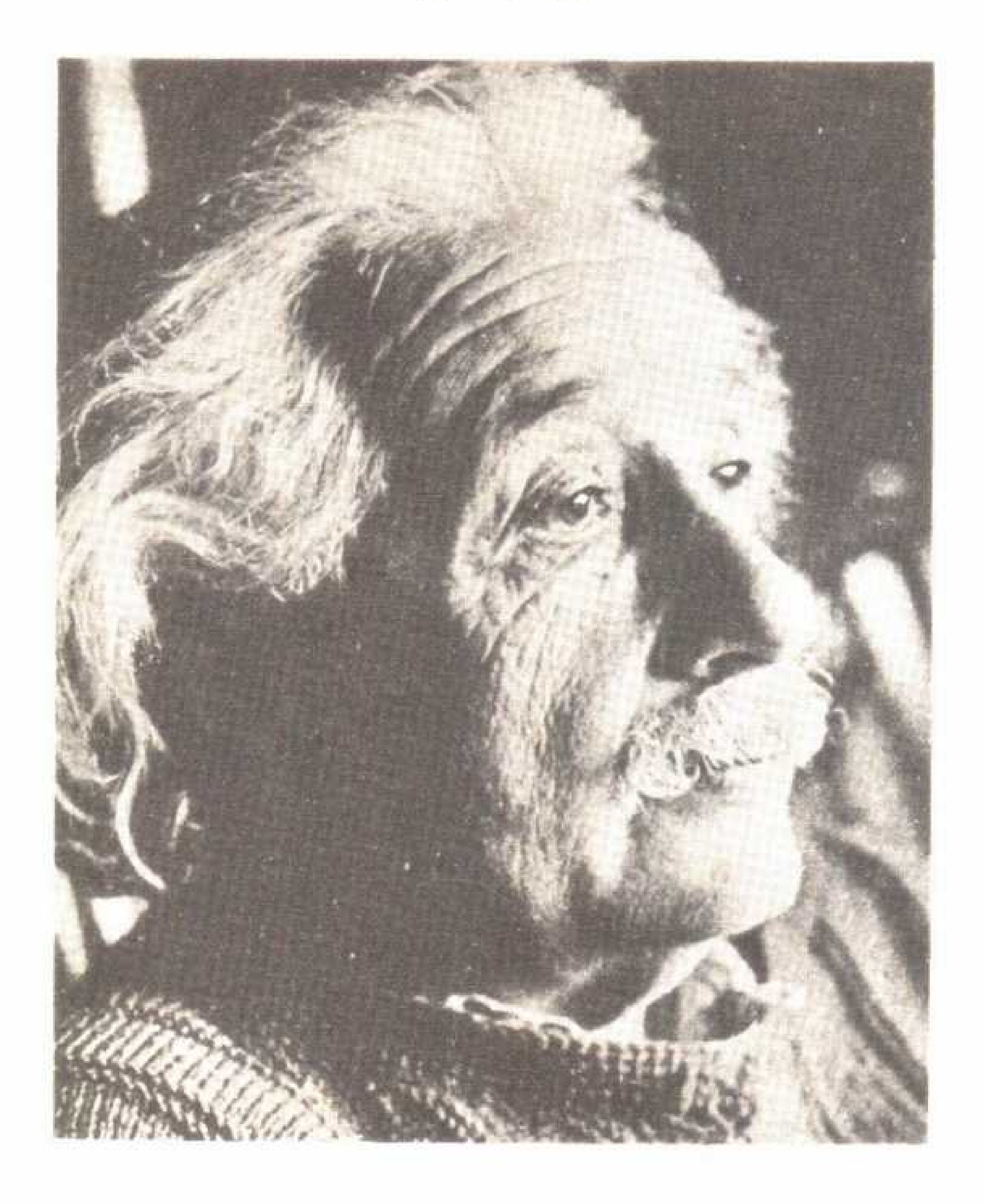
1 LA RELACION MASA-ENERGIA

3

La masa y la energía, que hasta la fecha fueron interpretadas como entidades individuales distintas y gobernadas por sus propias leyes de conservación, se sabe ahora que son *mutuamente equivalentes* y *convertibles*. La capacidad de intercambio entre ambas juntamente con una ley combinada de *masa-energía* aplicable al proceso, es uno de los grandes descubrimientos de la física moderna.

En 1905, Albert Einstein propuso la famosa ecuación:

$$E = mc^2 \qquad (3\text{-}1)$$



ALBERT EINSTEIN
(1879-1955)

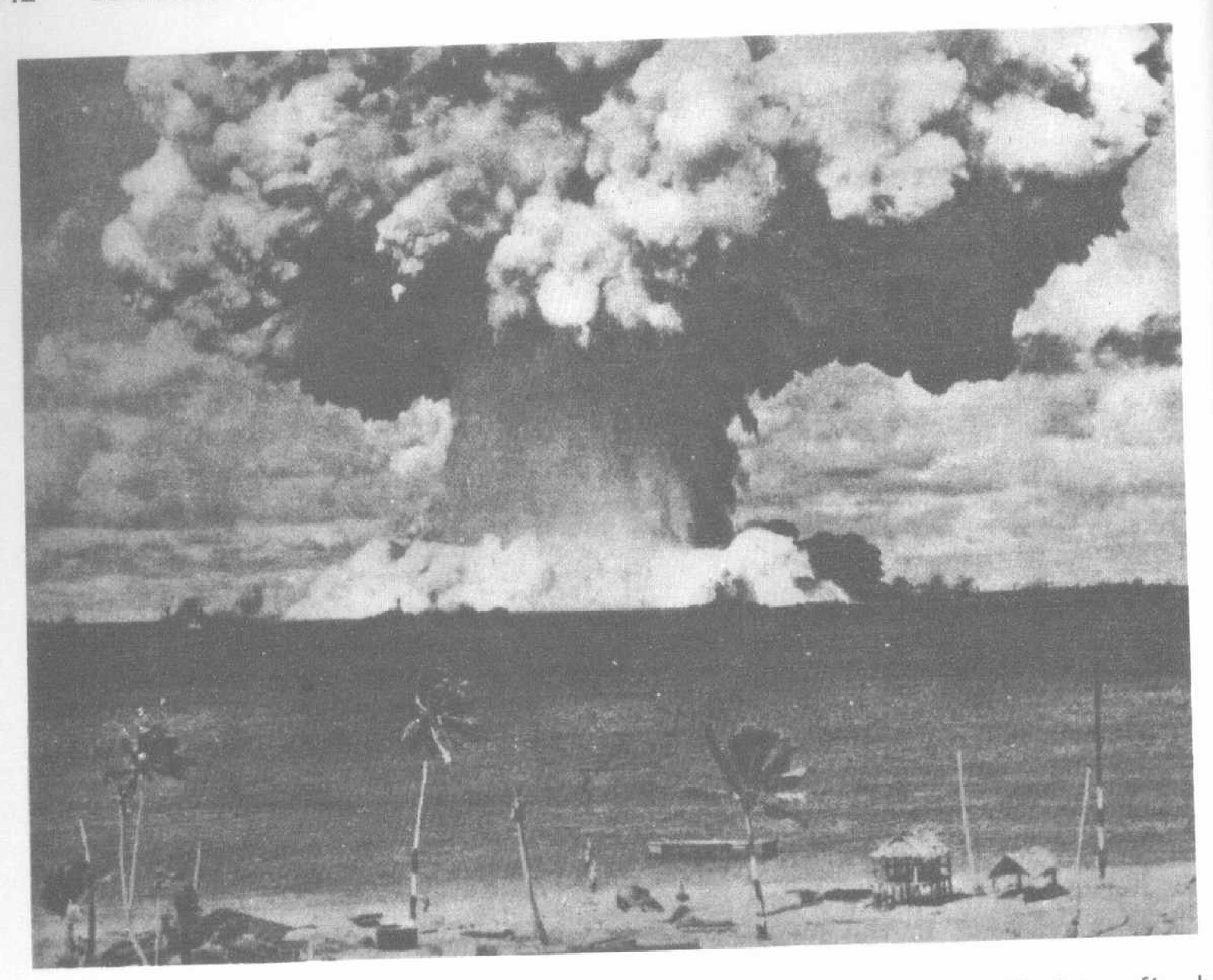


Fig. 3-1. Explosión de ensayo de la bomba atómica en el atolón de Bikini (1946). Fotografía de la Marina de los Estados Unidos de Norteamérica.

que expresa en términos matemáticos la equivalencia exacta entre la masa y la energía. En esta ecuación, E simboliza la energía, m indica el equivalente en masa de esta energía, y el factor c^2 (el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío) es el factor de proporcionalidad. Einstein obtuvo esta relación a partir de su propia teoría de la relatividad y de la ecuación de Lorentz, que relaciona la masa de un cuerpo con su velocidad. Debido a que la masa varía con la velocidad, Einstein concibió a la misma como un "depósito" de energía, que también varía con la velocidad.

Actualmente sabemos que una cantidad calculable de variación de energía, ΔE, se libera o se absorbe toda vez que existe alguna variación, Δm, en la masa de un cuerpo, y viceversa. Si se reduce la velocidad de un cuerpo que se desplaza en forma rápida, la reducción de su energía se produce por una disminución de la masa; si se acelera la velocidad del cuerpo, la ganancia de energía está acompañada por una ganancia de masa. Aun en reacciones químicas comunes (extra-nucleares), las variaciones de energía se producen conjuntamente con las de masa, si bien se admite que los resultados no pueden comprobarse ni mediante la balanza de laboratorio más sensible. Por otra parte, en las reacciones nucleares, las variaciones de energía son tremendas, y las de masa pueden medirse fácilmente. En la explosión de la bomba atómica (fig. 3-1), se destruye una parte considerable de la masa nuclear del uranio o el plutonio fi-

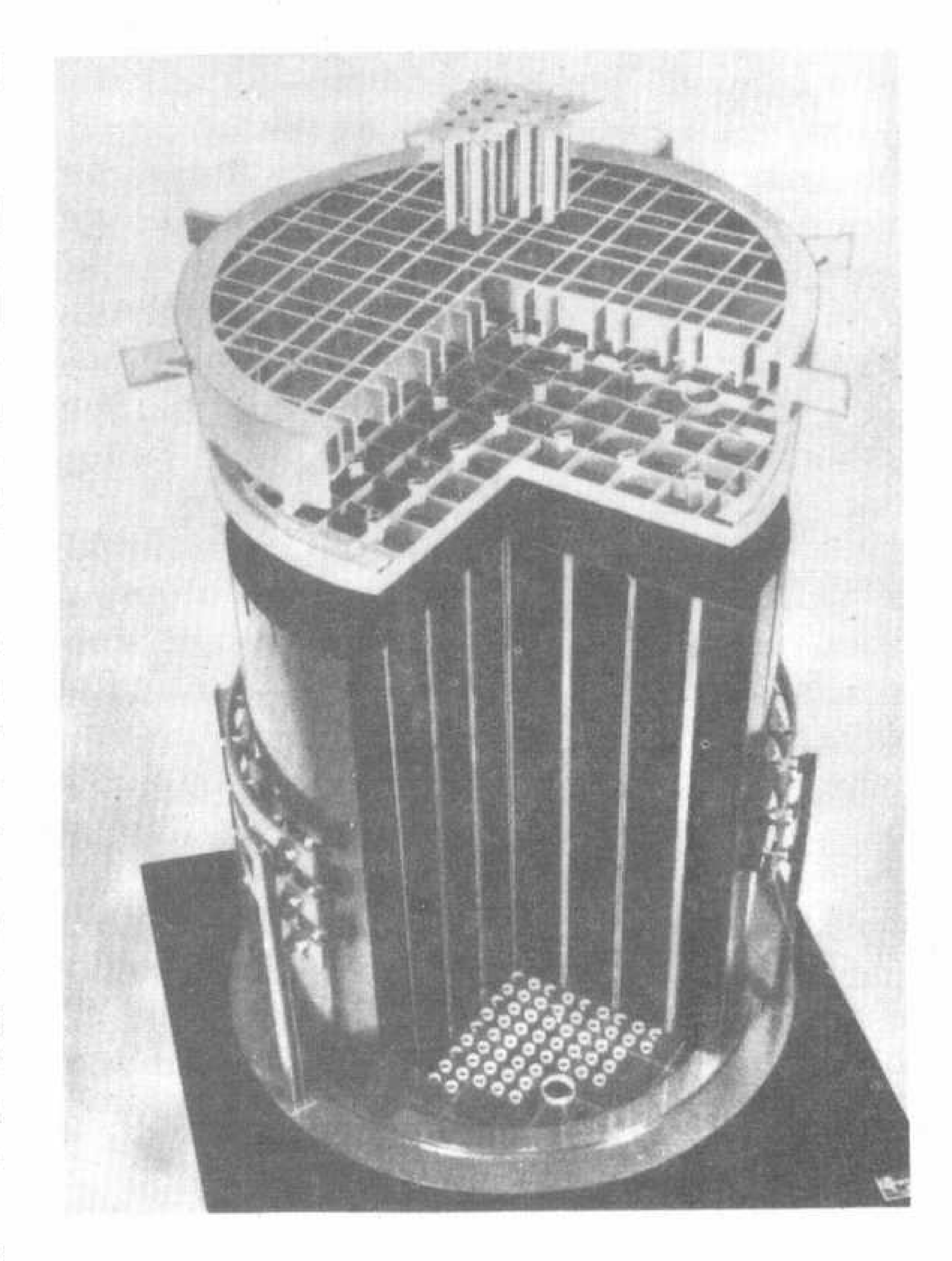


Fig. 3-2. Núcleo para un reactor experimental enfriado con gas.

sionables y la liberación de gran cantidad de energía equilibra la relación masa-energía. En un reactor nuclear, como el representado en corte en la fig. 3-2 puede llevarse a cabo una transformación *controlada* masa-energía de la misma índole Controlada o no, la masa es capaz de ser "puesta en acción" o "descongelada" para liberar *energía.*

En la ecuación (3-1), la masa puede expresarse en *gramos,* el valor de *c* en *centímetros por segundo* ($c = 3 \times 10^{10}$ cm/seg), y la energía equivalente en *ergios.* O, utilizando el sistema MKS, podemos expresar la masa en *kilogramos,* la velocidad de la luz en *metros por segundo* ($c = 3 \times 10^8$ m/seg), y la energía equivalente en *julios.* La conversión de 1 g masa en energía, genera $1 \times (3 \times 10^{10})^2$ o 9×10^{20} ergios, o 9×10^{13} julios. La energía equivalente de 1 gramo de *cualquier* cuerpo es de 25.000.000 kWh.

La fig. 3-3 ilustra una pequeña parte de la energía liberada en forma de luz por uan muestra de 1.000 Ci (curie) de tantalio radioactivo sometido a desintegración nuclear. La mayor parte de la energía emitida durante el proceso escapa a la detección mediante la cámara. Esta parte luminosa de la energía liberada se conoce como *radiación de Cerenkov.*

Consideremos una reacción nuclear simple tal como la que tiene lugar al reunir los componentes de una partícula alfa, ${}^4_2He$. Este es el núcleo de un átomo de

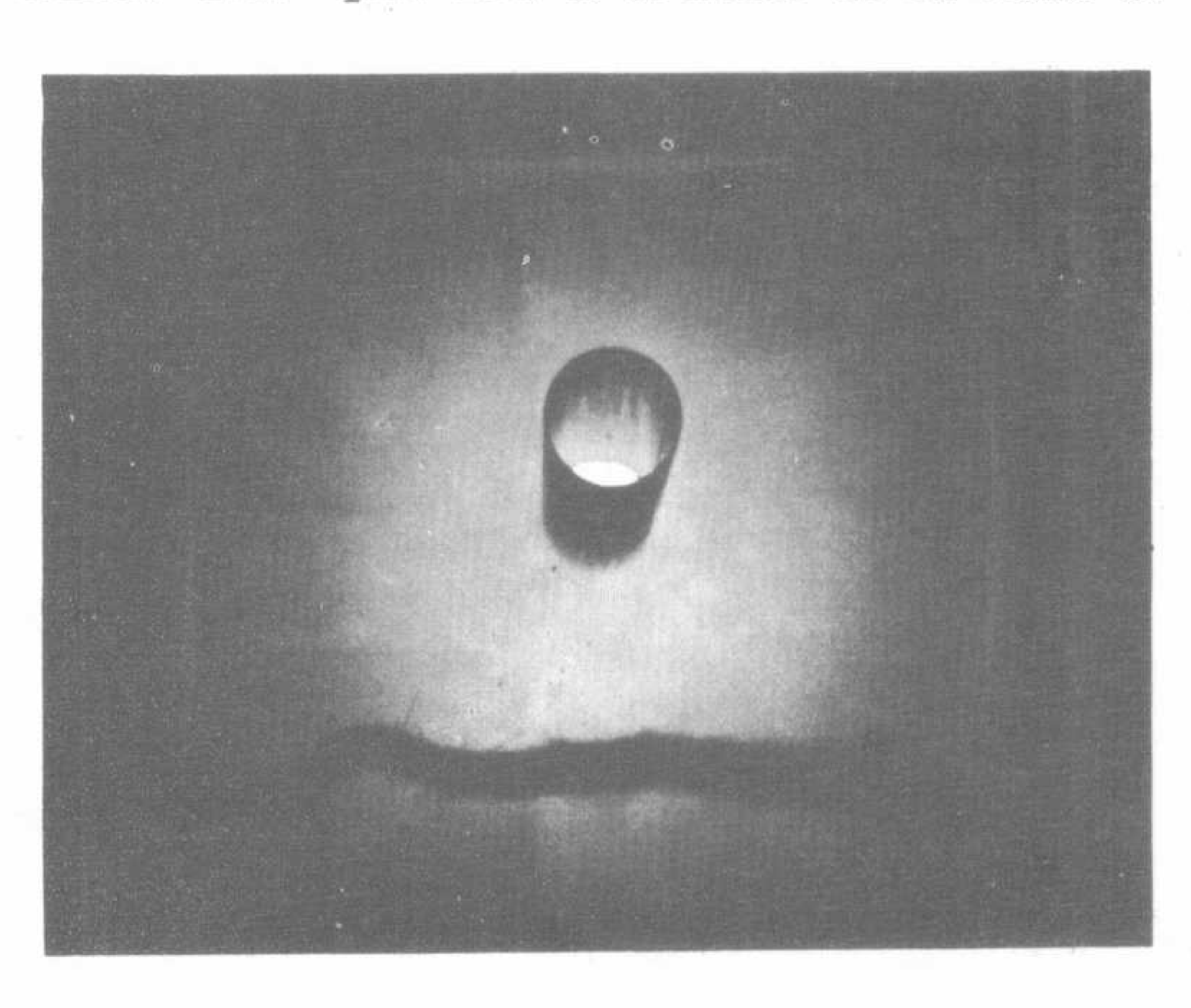


Fig. 3-3. Una fuente de 1.000 Ci de tántalo radioactivo que centellea debajo del agua en el interior de un caño de acero. La luz es parte de la energía liberada por la desintegración nuclear del material.

helio formado por dos protones y dos neutrones. Podemos expresar las masas de estas partículas elementales en la escala de masas atómicas, empleando la *unidad de masa atómica,* definida como 1/16 de la masa del átomo de oxígeno, $^{16}_{8}O$ o tal como se ha recomendado recientemente, como 1/12 del isótopo del carbono $^{12}_{6}C$. Por lo tanto, la masa combinada de dos protones es 2 × 1,00814, y la de dos neutrones es 2 × 1,00898, lo cual da un total de 4,03424 unidades de masa atómica (uma). No obstante, la masa real de una partícula alfa es sólo 4,00386 uma. En consecuencia, el *defecto de masa* resultante es 4,03424 — 4,00386 o sea 0,03038 uma, que representa como veremos más adelante, la *energía de ligadura* equivalente de la partícula alfa. Se demostrará que ésta es la energía que mantiene unido al núcleo de helio y que debe agregarse al mismo para que éste deje en libertad sus componentes.

En relación con las reacciones nucleares, se emplean ciertas unidades especiales de energía. Una unidad de este tipo es el *electrón voltio* (eV), definido como la energía adquirida por un electrón cuando se lo acelera mediante una diferencia de potencial de un voltio. Es una cantidad de energía excesivamente pequeña, igual a 1,60 $\times 10^{-12}$ ergios. Un *millón de electrón voltios* (1 MeV) equivale a 1,60 $\times$ 10^{-6} ergios, y *mil millones de electrón voltios* (1 BeV, o 1 GeV) equivalen a 1,60 $\times 10^{-3}$ ergios.

Las masas nucleares también pueden expresarse en estas unidades, debido a que por la ecuación de Einstein se pueden intercambiar masa y energía. Así, la masa de un electrón en reposo puede expresarse ya sea como 9,1 $\times 10^{-28}$ gramos o en forma aproximada como 0,5 MeV. La energía de un electrón acelerado mediante un betatrón (acelerador de partículas), puede sobrepasar los 300 MeV. Se pue-

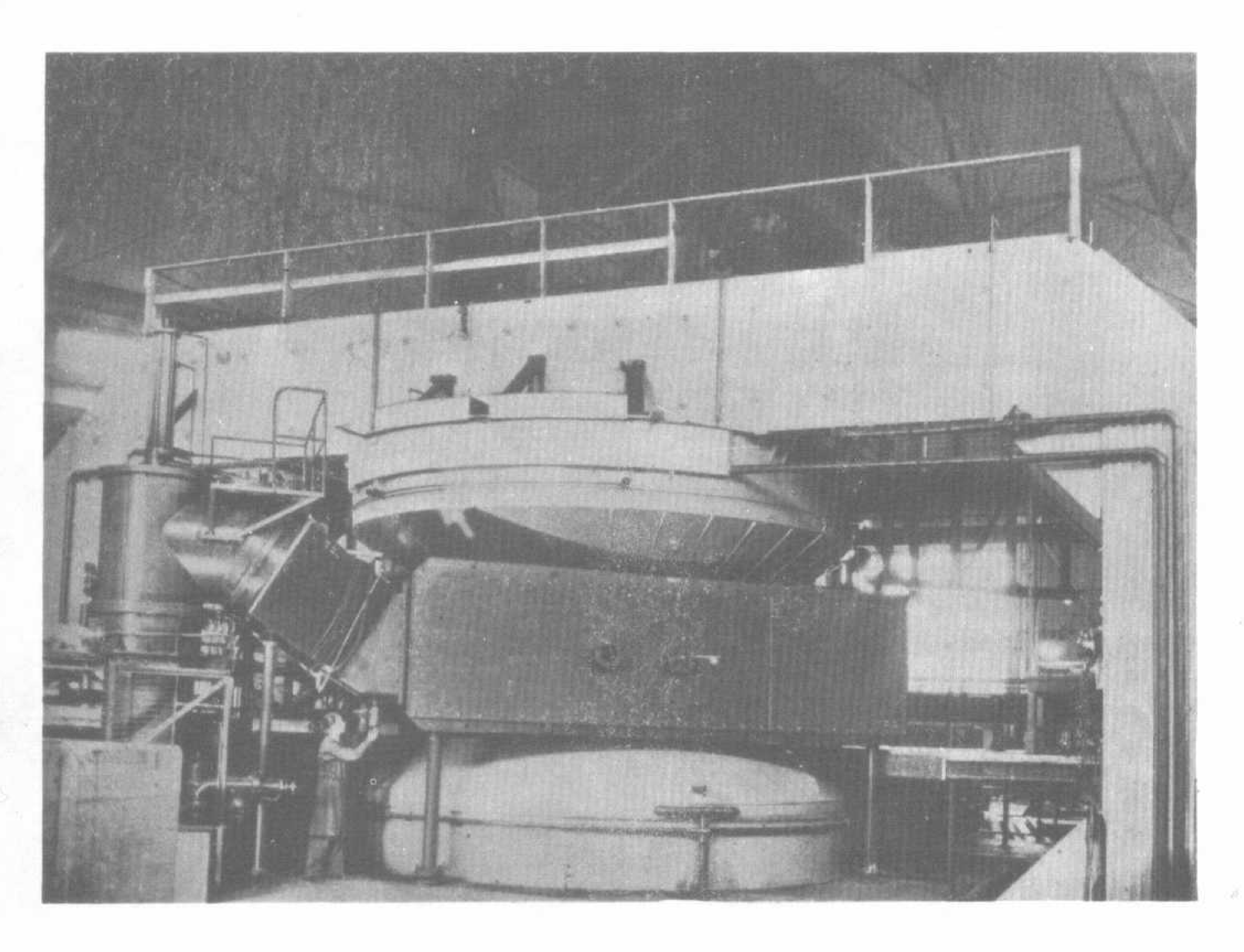


Fig. 3-4. El sincrociclotrón de 467,4 cm existente en la Universidad de California, Berkeley. (El diseño fue recientemente modificado para proveer un haz de protones de una energía de 730 MeV.)

de demostrar que el valor de la energía de una unidad de masa atómica ($1{,}66 \times 10^{-24}$ g) es igual a 931 MeV, tomando entonces la ecuación (3-1)

$$E = m \times 931 \qquad (3\text{-}2)$$

la forma donde E está expresada en MeV y m en unidades de masa atómica.

Antes de considerar los detalles de las reacciones nucleares, señalamos que también ha sido posible "crear" materia mediante aceleradores de alta energía. El *sincrociclotrón* de Berkeley (EE.UU. de Norteamérica) de 467 cm (fig. 3-4) produjo *mesones* π de corta vida durante el bombardeo de un objetivo de carbono mediante partículas alfa de 490 MeV. Los mesones π tienen una masa aproximadamente 275 veces mayor que la de un electrón.

2 ENERGIA DE LIGADURA

En el Capítulo 2 hemos visto que el núcleo de un átomo está compuesto por protones (p) y neutrones (n). La "anatomía" precisa del núcleo es aun un misterio, como lo es la naturaleza exacta de las fuerzas que mantienen unido al núcleo.

En los elementos de bajo número de masa, (A), la relación del número de neutrones a protones es próxima a la unidad. Los núcleos de esos elementos alcanzan así un grado de equilibrio o estabilidad, siendo neutralizadas las fuerzas p-p, o de Coulomb por las fuerzas de intercambio y atracción ligeramente más grandes que existen entre todas las partículas nucleares. A medida que se eleva el número atómico de 20 a 50, se hace necesaria una proporción más grande de neutrones para dar estabilidad al núcleo. Sin embargo, el aumento en la relación de neutrones a protones no es suficiente para neutralizar completamente las fuerzas de repulsión rápidamente crecientes, con el resultado de que la energía de ligadura nuclear, medida de la estabilidad nuclear, desciende nuevamente cuando el número de masa atómica supera a 50 y se acerca a 92 (en el $^{235}_{92}U$).

La *energía de ligadura* es el equivalente del *defecto de masa* expresada en gramos o unidades de masa atómica, observada al reunir o separar los núcleos.

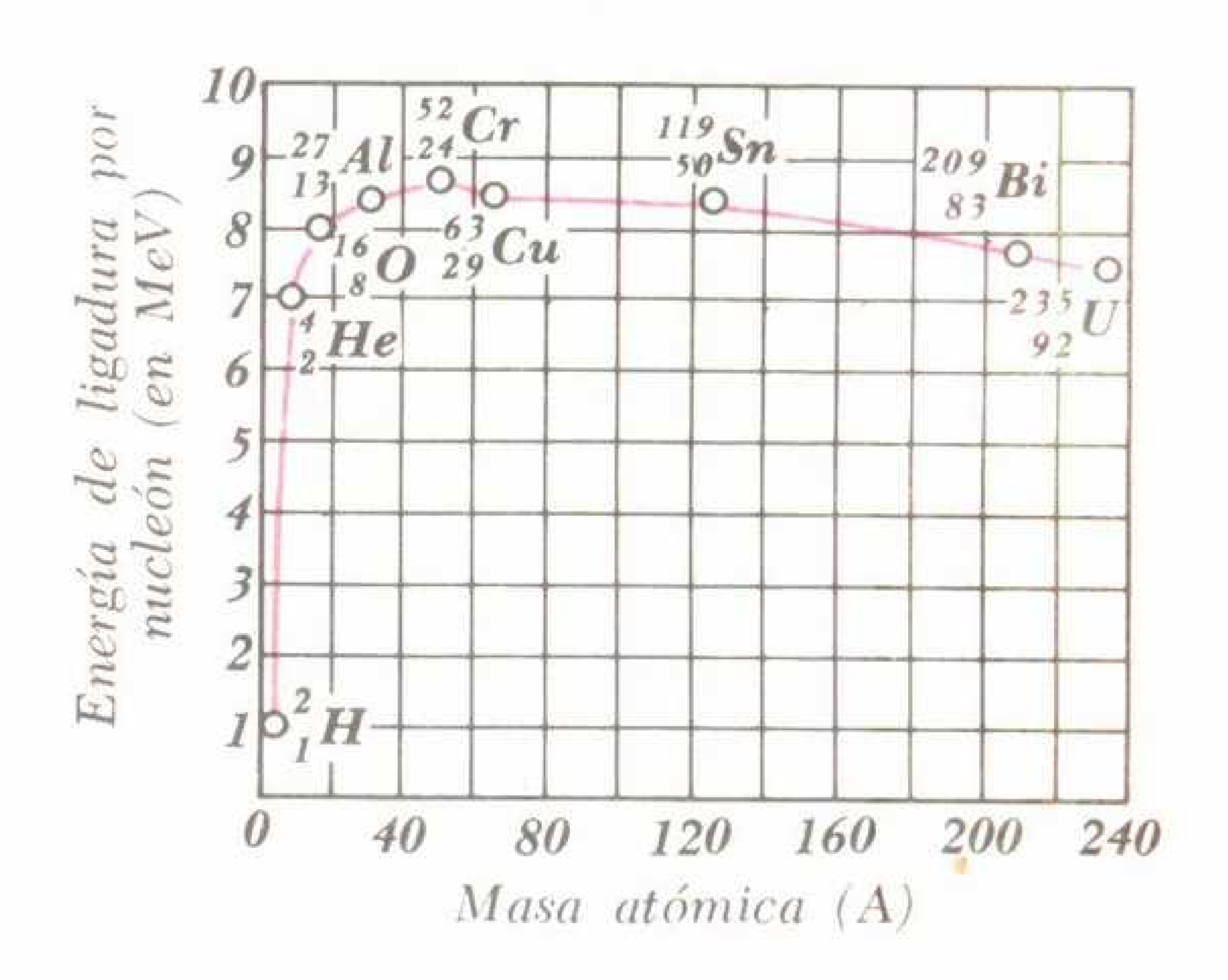


Fig. 3-5. Variación de la energía de ligadura por nucleón en función de la masa atómica.

Si la energía de ligadura es grande, el núcleo es estable. La energía de ligadura de un deuterón ($^{2}_{1}H$) es 2,19 MeV, y su energía por *nucleón* (o por subpartícula) es 2,19/2, o 1,09 MeV. Las energías de ligadura aumentan con los números de masa, llegando a 8,79 MeV/nucleón para el hierro ($^{56}_{26}Fe$). Prosiguiendo a lo largo de la escala, las energías de ligadura descienden hasta el valor relativamente bajo de 7,60 MeV/nucleón para el uranio ($^{235}_{92}U$).

La fig. 3-5 es un gráfico que ilustra la variación de energía de ligadura por nucleón, en relación al número de masa A de una serie de elementos. (Se ha alisado la curva y no se han tenido en cuenta las diversas irregularidades existentes en la región de los elementos livianos. Debido a que la energía de ligadura de un átomo está determinada por su defecto de masa, la curva también muestra que los elementos estables situados en la parte central de la Tabla Periódica de los Elementos, tienen los mayores defectos de masa.

En la fisión del uranio o la fusión de

elementos livianos, se obtienen otros elementos situados más cerca de la parte central de la Tabla. Estos tienen un defecto de masa mayor y lo que se convierte en energía en estas reacciones es el *aumento en el defecto de masa* (*disminución de la masa*). La cantidad de energía liberada puede determinarse mediante la ecuación Einstein. Al igual que en todas las transformaciones de energía consideradas en este libro, la progresión se realiza en el sentido de máxima estabilidad.

3 PRIMERAS TRANSFORMACIONES NUCLEARES

En 1919, cuando Lord Rutherford dirigió por primera vez partículas alfa no aceleradas contra núcleos de nitrógeno, la transmutación de los elementos se convirtió en una realidad de laboratorio.

La fig. 3-6, parte (A) es un diagrama simplificado del aparato utilizado. Una fuente radioactiva que sirve como disparador de partículas alfa, fue colocada sobre un soporte móvil alojado en el interior de uan caja metálica cerrada. En un extremo, se colocó una delgada lámina de plata, transparente para las partículas alfa, a una distancia de 1 ó 2 mm, había además una pantalla fluorescente de sulfuro de cinc. Se tomaron medidas para llenar la caja con gases diferentes y para observar con un microscopio de baja potencia, cualquier centelleo que se pudiera producir sobre la pantalla fluorescente.

Durante el transcurso de sus experimentos, Rutherford llenó la caja con nitrógeno, y reguló la distancia existente entre la fuente y la pantalla de manera que las partículas alfa no llegaran rápidamente a ésta. (También se aseguró que se produjera el mismo efecto al cambiar el espesor de la lámina de plata existente). Pese a la restricción lograda de esta manera sobre el grado de desplazamiento de las partículas alfa, Rutherford observó destellos de luz sobre la pantalla, que atribuyó en forma correcta a los *protones* liberados como resultado del bombardeo. Los protones se obtenían a partir de la reacción:

$$^{4}_{2}\text{He} + {}^{14}_{7}\text{N}$$

partícula alfa + nitrógeno

$$\rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{H} - Q$$

isótopo del oxígeno + protón — energía

Obsérvese que Q es *negativa*, lo cual significa que se *absorbe* la energía, más bien que se *libera*, en el proceso. Esto se debe a la producción de un *exceso* en lugar de un *déficit* de masa.

La reacción precedentemente descripta es del tipo α-p: indicando α la partícula de bombardeo (alfa), y p la partícula de rechazo (protón). En realidad, la reacción se produce en dos etapas, tal como se ilustra en la fig. 3-6, parte (B).

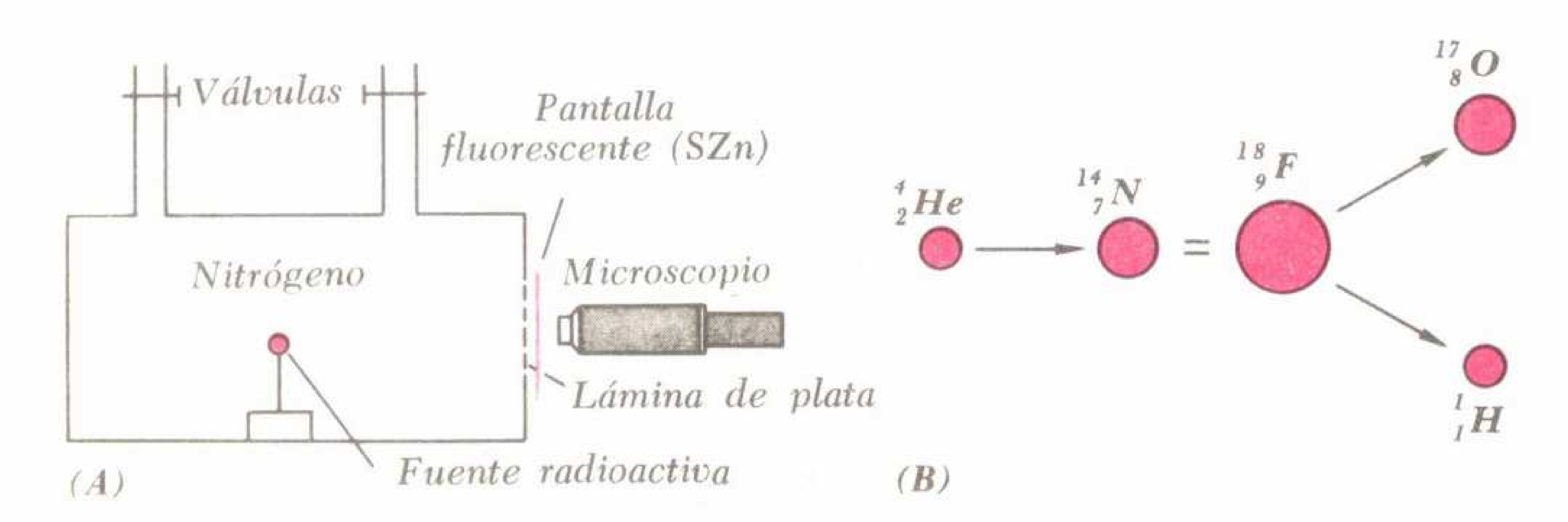


Fig. 3-6. (A) Experimento de Rutherford del año 1919: transmutación del nitrógeno en oxígeno. (B) Representación esquemática de la primera transmutación producida mediante bombardeo subatómico.

El núcleo de nitrógeno se convierte en forma momentánea en un núcleo inestable de flúor, que luego se disocia en productos de desintegración finales *estables*.

Visto en forma retrospectiva el experimento de Rutherford resulta notable, si consideramos que la posibilidad de un choque directo de una partícula alfa con un núcleo de hidrógeno es poco probable. Ante todo, el "invasor" cargado positivamente atraviesa grandes espacios vacíos existentes entre las moléculas de gas y cuando es inminente un choque directo, experimenta una fuerte repulsión creada por el campo de fuerzas positivas del número "huésped". Actualmente sabemos que los proyectiles subatómicos, aun si no están acelerados, penetran en la *barrera de potencial* establecida alrededor del átomo que hace las veces de objetivo, simplemente haciendo un túnel a través del

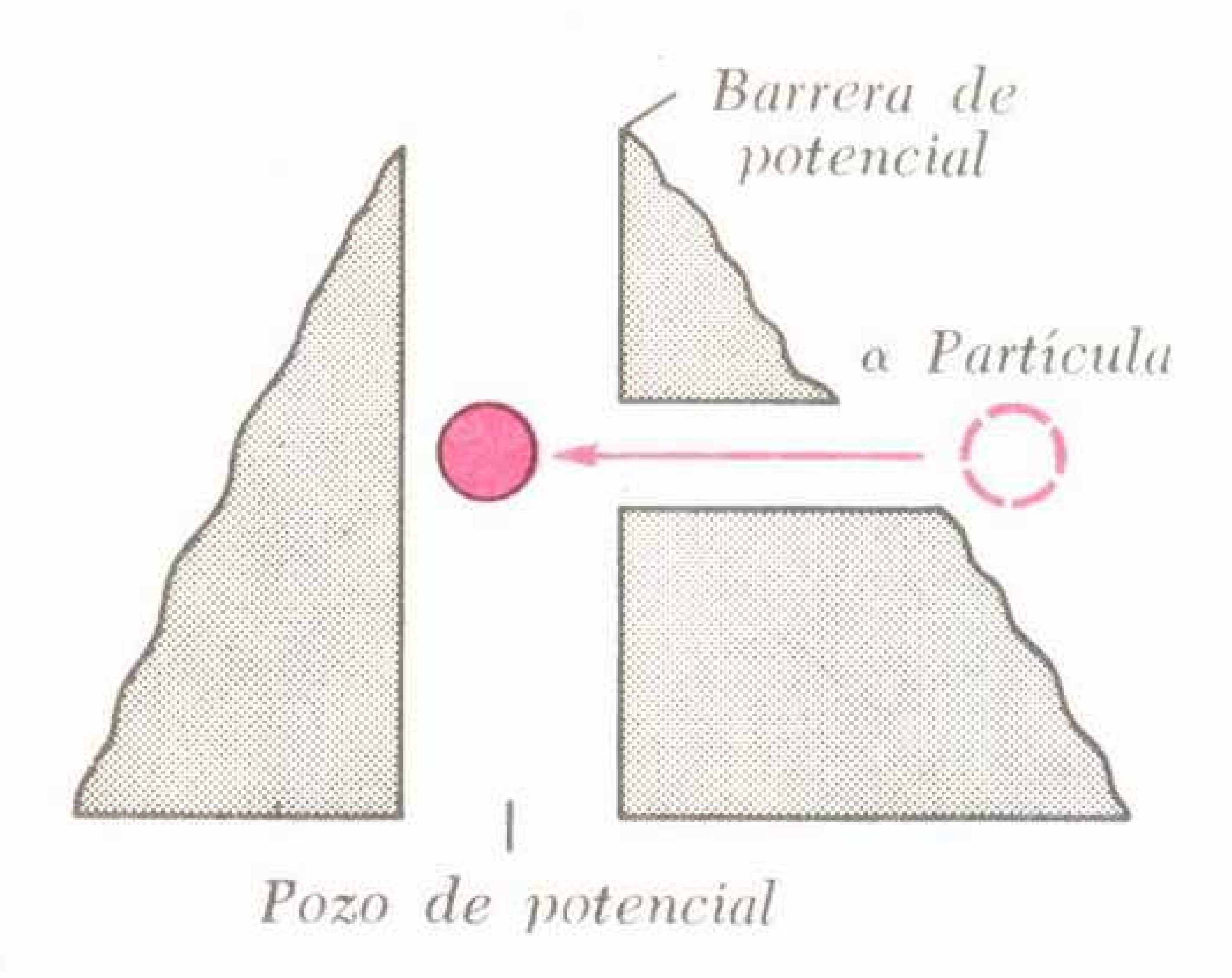


Fig. 3-7. Diagrama del "pozo de potencial". Se ilustra una partícula alfa desplazándose a través de la barrera nuclear, aun cuando carece de energía suficiente como para pasar por encima de la parte superior.

mismo (fig. 3-7). Estas penetraciones se producen lo suficientemente a menudo como para generar la desintegración nuclear observada.

Rutherford y sus colaboradores intentaron posteriormente otras reacciones α-p, bombardeando una serie de elementos livianos con partículas alfa (que eran los únicos proyectiles que se podían obtener en aquel momento). Obtuvieron una transmutación de cada uno de los elementos bombardeados (excepto del berilio), la cual era seguida por un desprendimiento de protones. Cuando ensayó con elementos más pesados, se halló que éstos resis-

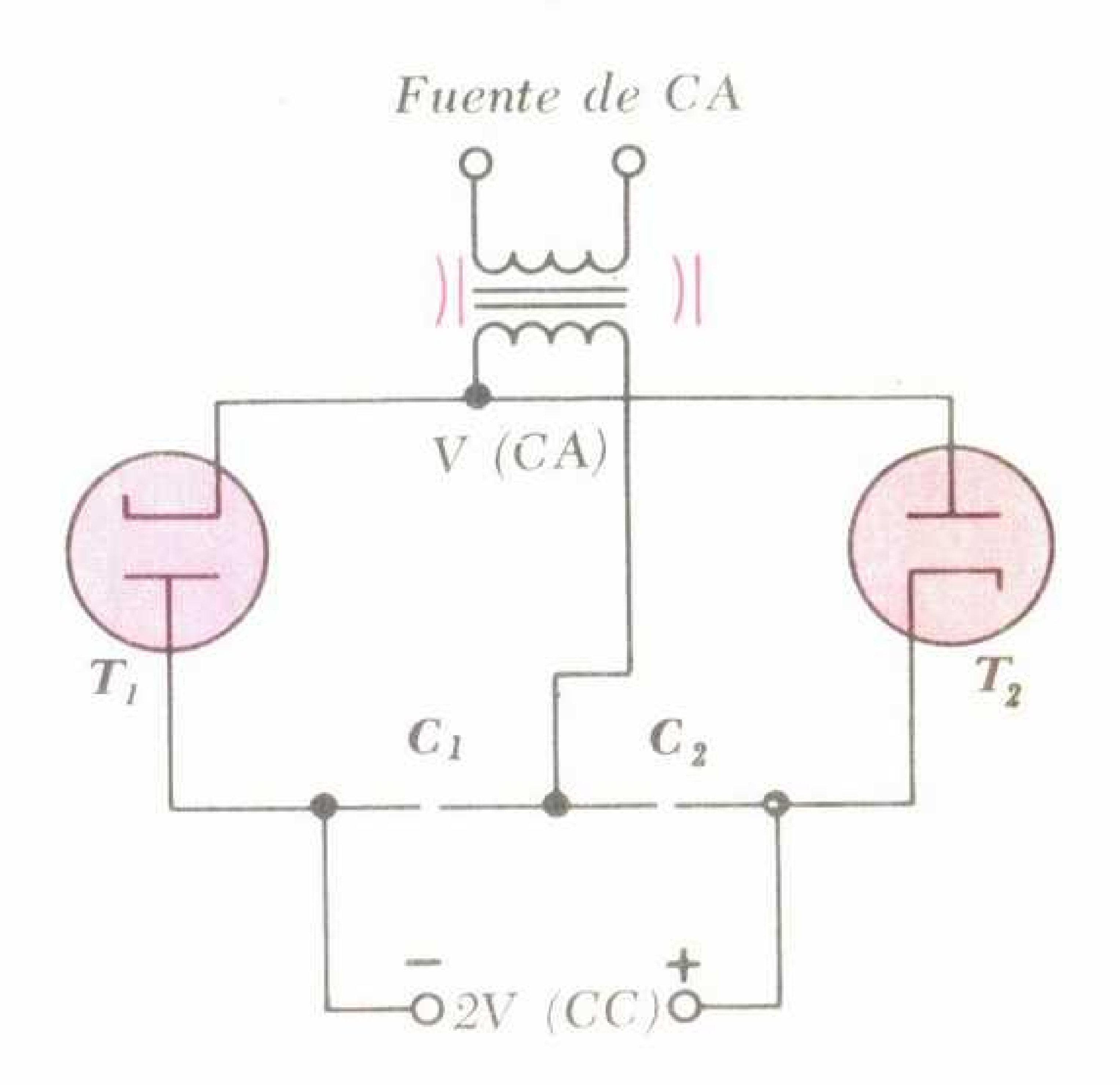


Fig. 3-8. Circuito doblador de tensión. Una serie de estos dobladores en cascada fue empleada por Cockcroft y Walton para obtener una elevada diferencia de tensión unidireccional para su experimento con el acelerador. Los capacitores C_1 y C_2 están en serie con los tubos rectificadores T_1 y T_2, y se cargan en forma alternativa hasta una diferencia de potencial de C.C., V. La diferencia de potencial entre ambos capacitores es de casi 2 V. Las máquinas modernas utilizan rectificadores de estado sólido.

tían vigorosamente el acercamiento de las partículas alfa, y que esta resistencia aumentaba con el aumento del número atómico del elemento. Se hizo evidente que pronto serían necesarios otros proyectiles y aceleradores de alta energía para llevar adelante la investigación nuclear.

En 1932, Cockcroft y Walton, que trabajaban en el laboratorio de Rutherford, fueron los primeros en bombardear núcleos atómicos con partículas *aceleradas*. Como "proyectiles" emplearon *protones* o iones hidrógeno que obtenían de una fuente de descarga de gas. El haz cuidadosamente alineado de protones se aceleraba mediante sistemas multiplicadores de tensión, "dobladores" de la corriente rectificada

(fig. 3-8), que al principio generaban 300.000 voltios y posteriormente llegaron hasta 800.000 voltios. Los protones chocaban con una pieza de litio, y producían una lluvia de partículas alfa de acuerdo con la siguiente ecuación *p*-α:

${}^{1}_{1}H$	+	${}^{7}_{3}Li$
protón		litio
$2\ {}^{4}_{2}He$	+	Q
partículas alfa		Energía

Se halló que el valor de *Q* (*energía liberada*) era de 17,3 MeV, la cual era puesta en libertad mediante una cantidad tan pequeña como 0,1 MeV de energía del protón.

En la fig. 3-9 se ilustra otra forma del generador de Cockcroft-Walton. La máquina, instalada en Brookhaven, provee 750.000 eV para la aceleración inicial d protones que posteriormente entran en u acelerador lineal de 50 MeV, y que lueg a un sincrotrón aun más potente (3 BeV).

4 ACELERADORES MODERNOS

El *ciclotrón,* inventado en 1932 por físico norteamericano Ernest O. Lawrenc permite la aceleración múltiple de par culas cargadas positivamente tales com protones, deuterones y partículas alfa. diferencia del multiplicador de tensión d Cockcroft-Walton y del *acelerador line* actual ("linac"), el ciclotrón utiliza u campo eléctrico rápidamente alternativo un campo magnético unidireccional. S efecto combinado es el de obligar a l partículas a recorrer caminos circular

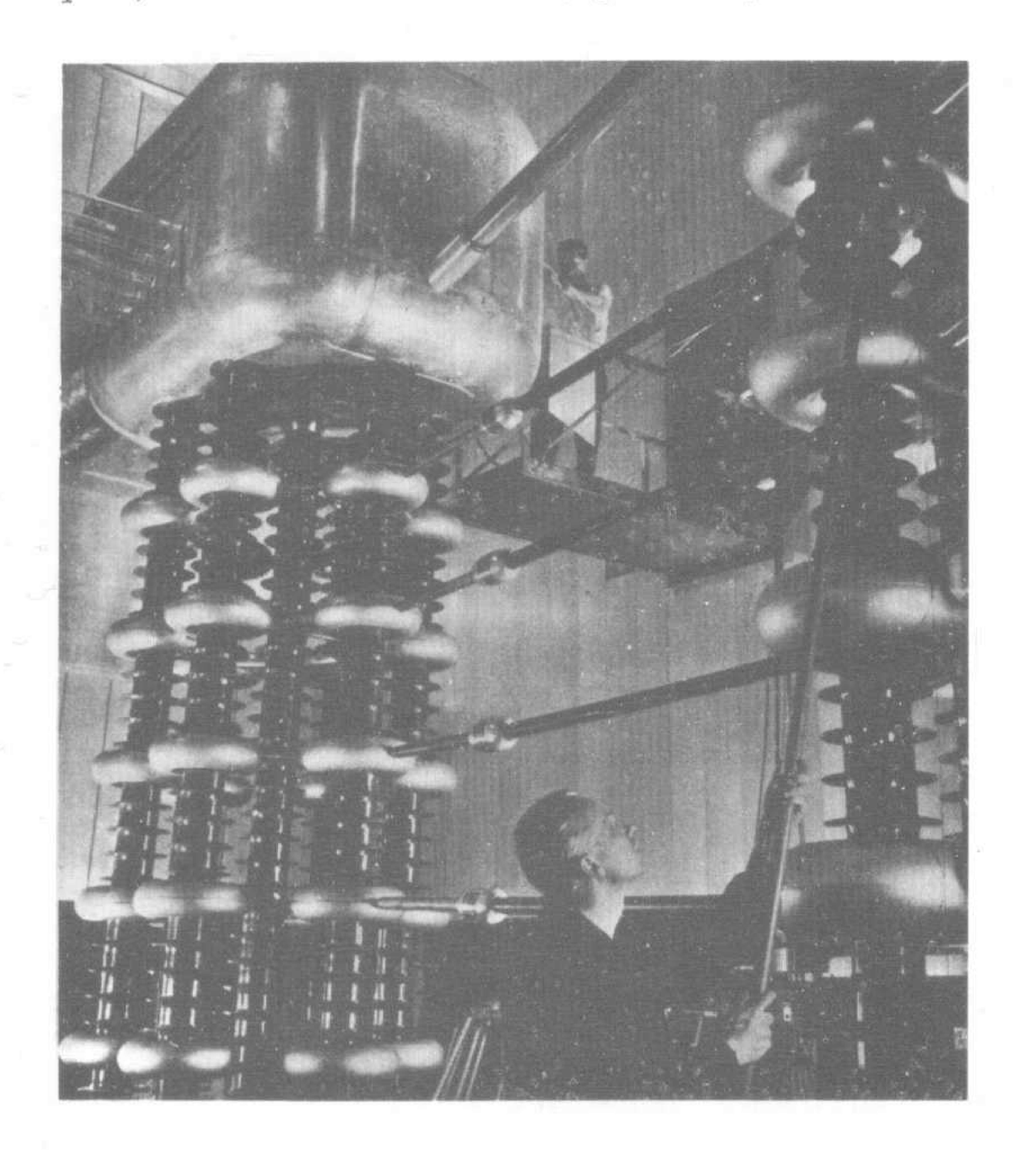


Fig. 3-9. El generador d Cockcroft-Walton propo ciona la primera etapa d la aceleración de protone La cúpula en el extrem izquierdo superior aloja fuente de protones.

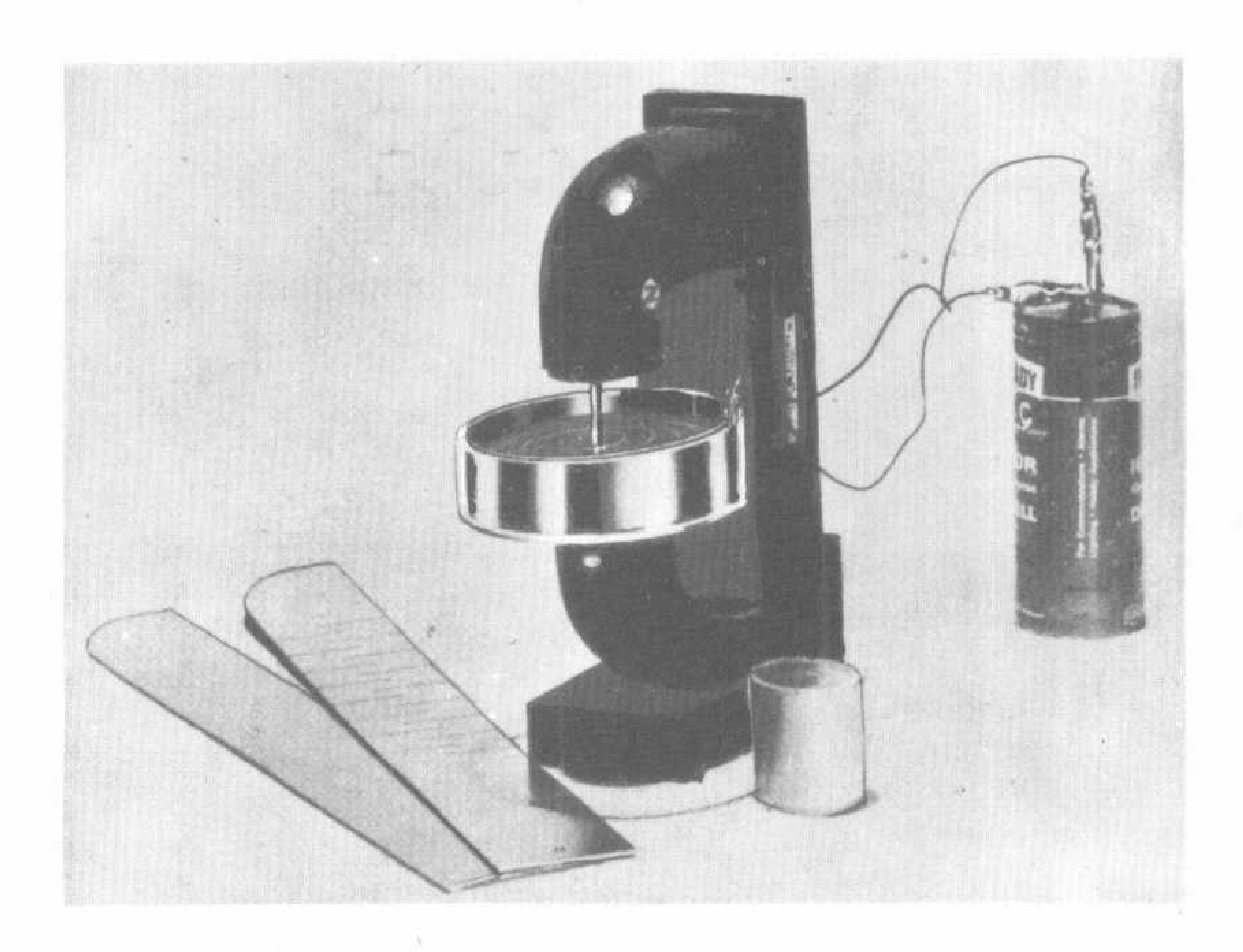


Fig. 3-10. Modelo de ciclotrón. El polvo de aserrín agregado al electrolito en el recipiente de plástico delinea el movimiento de los iones cuando éstos se arremolinan según círculos que se amplían.

de radio gradualmente creciente. Luego de una serie de giros, la partícula acelerada se aparta mediante una placa cargada obligándola a chocar contra un objetivo externo.

El principio del ciclotrón está ilustrado en la fig. 3-10, en la cual se observa un modelo de laboratorio para hacer girar iones cargados positivamente en un campo eléctrico-magnético combinado. En la fig. 3-11 se muestra un diagrama más real. Un par de cámaras huecas semicilindrícas (modeladas en forma de D) sirven como electrodos a los cuales se aplica una tensión alterna de muy alta frecuencia (r-f). Las denominadas cámaras en forma de D, están alojadas en el interior de una caja metálica sometida al vacío y dispuestas entre los polos de un potente imán permanente. El sentido del campo magnético es perpendicular al plano de la caja metálica y del campo eléctrico.

Un ion positivo liberado en el centro del sistema en forma de D, atraviesa la abertura, y entra en el semicilindro hueco que en ese momento es negativo. Luego se lo obliga magnéticamente a recorrer un trayecto semicircular y cuando completa el mismo, el campo eléctrico cambia de polaridad, con lo cual repele violentamente al ion. Como resultado de esta *resonancia magnética*, el ion gana permanentemente energía, alcanzando un nivel de varios MeV, a medida que recorre un camino en espiral hacia el exterior a través

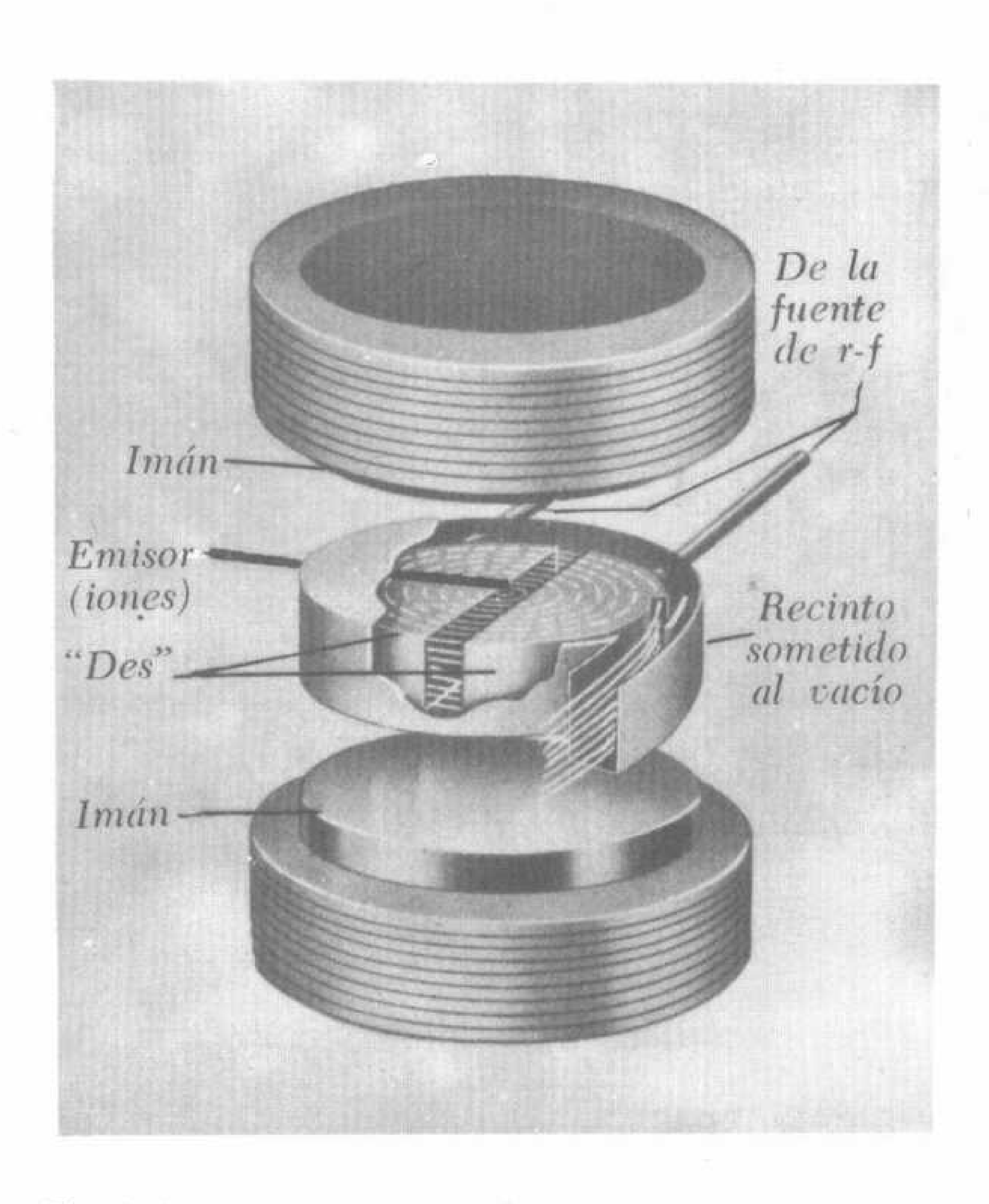


Fig. 3-11. Despiece simplificado de un ciclotrón.

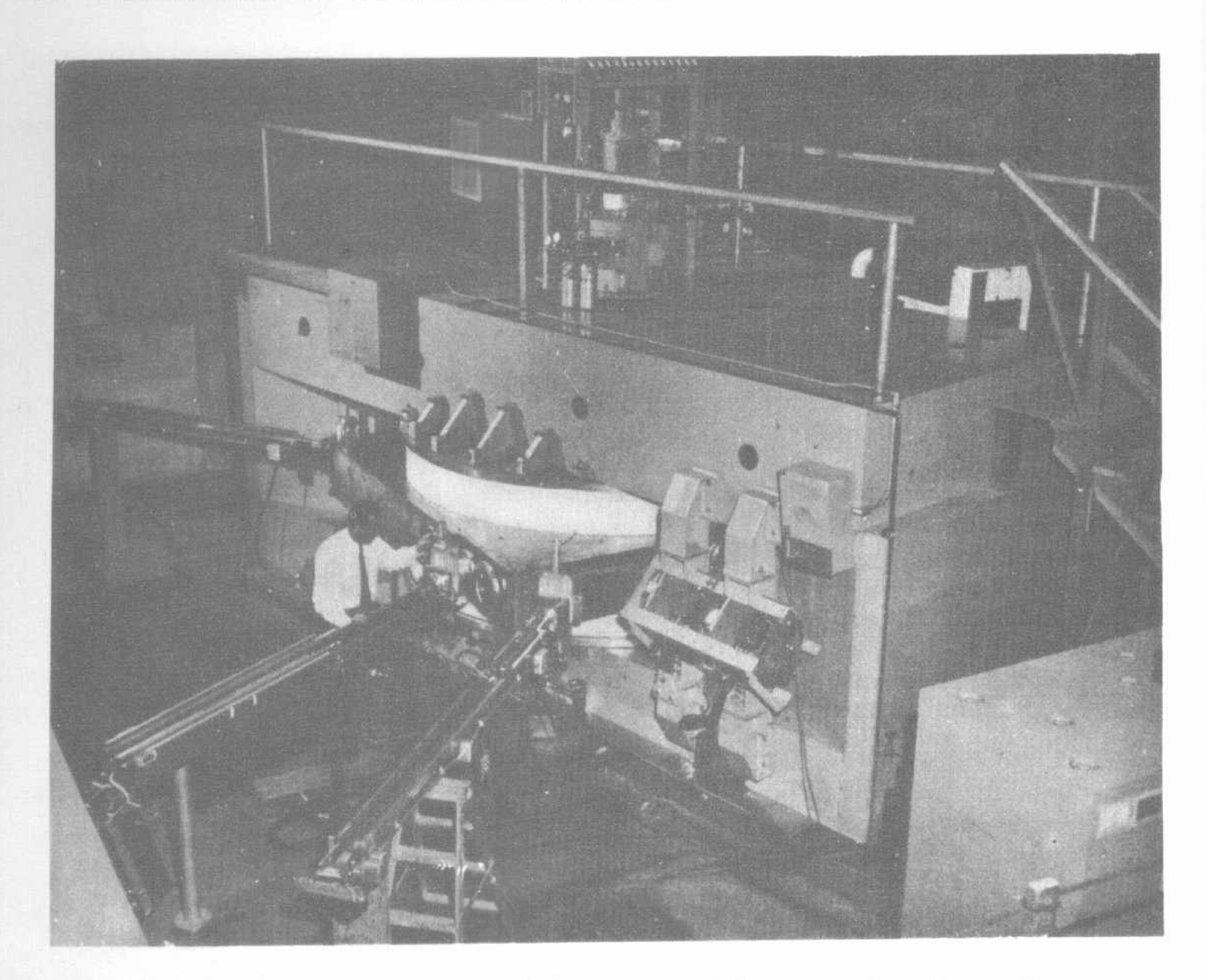


Fig 3-12. Ciclotrón de 224 cm con acanaladuras en espiral, que produce haces de protones o deuterones de alta intensidad con una energía máxima de 60 MeV, o haces de partículas alfa 120 MeV.

del acelerador. Se debe controlar cuidadosamente el período de regulación de la fuente de suministro de radiofrecuencia y la alineación del campo magnético. El tiempo empleado en cada recorrido semicircular es el mismo para todos los iones del mismo tipo, sea que se desplacen en forma lenta o rápida. El tiempo depende sólo de la fuerza del campo magnético y de la masa y la carga de las partículas.

El ciclotrón no es adecuado para acelerar electrones. La masa de un electrón que se desplaza en forma rápida aumenta rápidamente con su velocidad (efecto de relatividad). Como resultado, los electrones se desfasan rápidamente respecto al campo eléctrico alterno y la aceleración por resonancia termina rápidamente. El aumento en cuanto a la masa de las partículas relativamente más lentas, tales como los protones y deuterones, no es tan pronunciado, pero aun aquí se requiere un cambio en el diseño de la máquina para producir protones de un valor de energía superior a los 50 MeV.

El ciclotrón de *frecuencia modulada* o *sincrociclotrón,* está diseñado para corregir el efecto de masa variable. Si la masa de la partícula que se acelera aumenta, por ejemplo, en un 10 %, se hace descender en la misma cantidad la frecuencia de alimentación a fin de mantener una relación continua en fase o de resonancia. Tal como se mencionó anteriormente, el primer ciclotrón de Berkeley de 1 MeV y 94 cm de diámetro polar ha sido reconstruido

convirtiéndolo en un sincrociclotrón acelerador de protones de 730 MeV y 467,3 cm de diámetro polar. Otro ciclotrón de Berkeley (fig. 3-12) produce energía en forma de haces de hasta 60 MeV para los protones, 60 MeV para los deuterones y 120 MeV para las partículas alfa. El sincrociclotrón de Columbia entrega protones a un nivel de energía de 385 MeV.

El *betatrón o acelerador de inducción*, particularmente adecuado para la aceleración de electrones y la posterior producción de rayos X, fue inventado en 1941 por Donald W. Kerst. La máquina emplea un campo magnético alterno que atraviesa (según ángulos rectos) un "buñuelo" de vidrio sometido al vacío, que sirve como la pista de aceleración. El arrollamiento del electroimán actúa como *primario* de un transformador y la corriente de electrones (inyectada en el interior del tubo circular) como *secundario*. Los electrones se aceleran solamente durante un cuarto de ciclo del impulso de excitación, lapso durante el cual se los hace girar muchas miles de veces con lo cual adquieren una velocidad prácticamente igual a la de la luz. Un impulso adicional de corriente enviado a través de las bobinas de los electroimanes, desvía a los electrones de su trayectoria circular, y los obliga a chocar contra un objetivo, produciendo intensos rayos X. La inevitable radiación de energía establece un límite práctico de aproximadamente 22 MeV.

Los más potentes aceleradores actualmente en uso son los *sincrotrones de protones*, popularmente denominados *bevatro-*

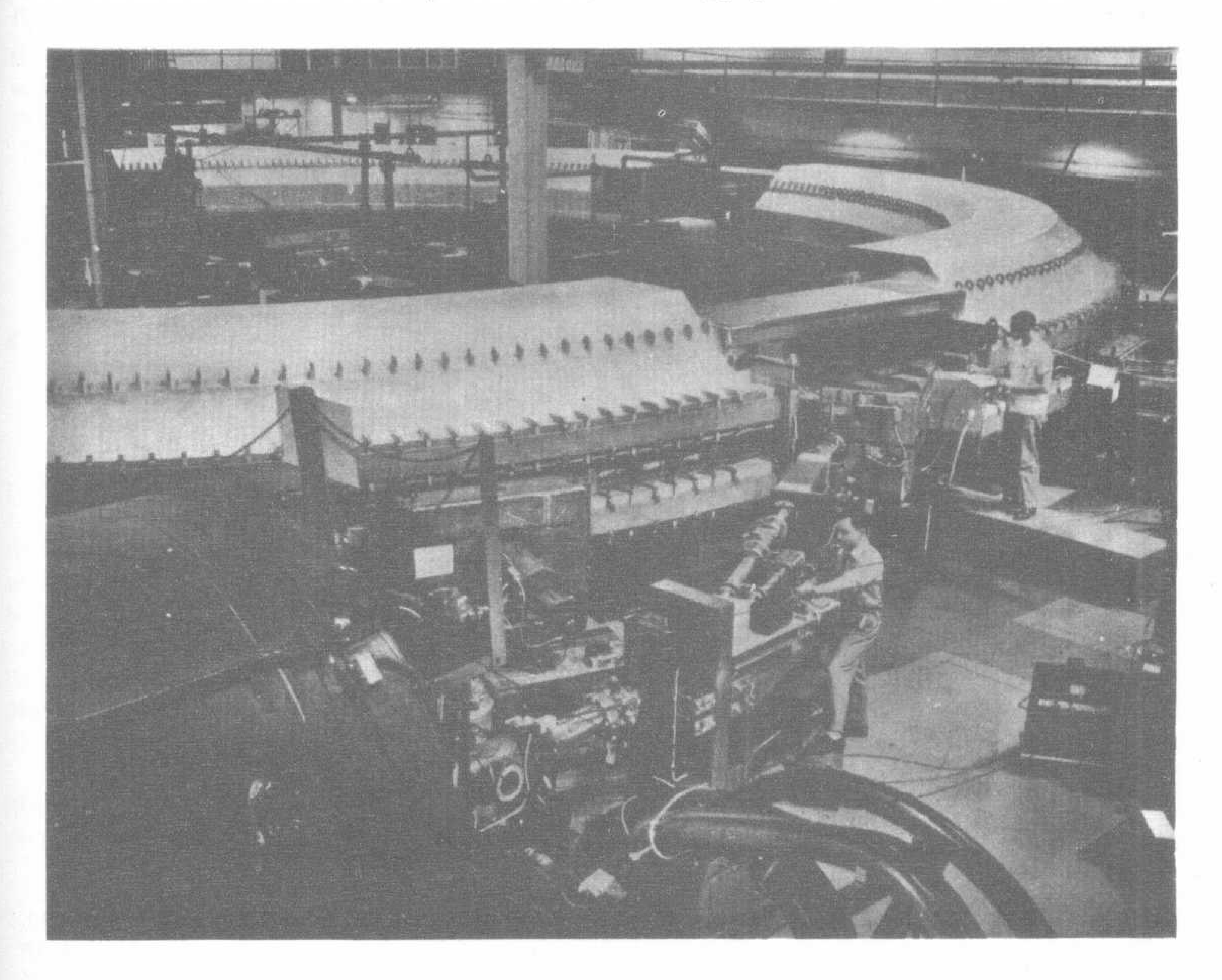


Fig. 3-13. Cosmotrón de 3 BeV de Brookhaven en el que se aprecian detalles del inyector de protones de Van de Graaff de 3 MeV. Se utilizan doce bombas de vacío para agotar el "circuito de carreras" principal modelado en forma de ala. El imán circular se excita mediante 40.000.000 de vatios de energía eléctrica.

nes (también conocidos como *gigatrones*). El nombre sugiere que producen energía del orden de los mil millones de electrón voltios. La fig. 3-13 ilustra el *cosmotrón* de 3 BeV, una máquina capaz de crear componentes de rayos cósmicos, en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (Brookhaven National Laboratory) en Upton, N. Y. (EE.UU. de Norteamérica). Un imán anular de 22 metros de diámetro y que pesa 2.200 toneladas hace desplazar a los protones según una trayectoria circular a través de una cámara sometida al vacío que tiene una fuente de suministro de radiofrecuencia variable que provee impulsos extra de energía a lo largo de la trayectoria. Los protones son inyectados en el interior de la cámara mediante la ayuda de un generador electrostático de Van der Graaf de 3 MeV, en un punto cercano a la periferia externa de la cámara.

El sincrotrón de protones de 6 BeV existente en el Laboratorio de Radiación de la Universidad de California es aun más impresionante en cuanto a sus dimensiones y provisión de energía (fig. 3-14). El imán, cuyo diámetro es de 36,6 metros, pesa 10.000 toneladas y los protones inyectados tienen una energía inicial de 10 MeV. El Laboratorio de Brookhaven tiene actualmente un ciclotrón de gradiente alternativo de 33 BeV (fig. 3-15). Se espera que el acelerador lineal de la Universidad de Stanford produzca un haz de electrones que recorra un tubo recto de cobre de aproximadamente 10 cm de diámetro y 3.048 m de longitud que estará enterrado a una profundidad de 7,62 m. La energía alcanzada por el haz será de 20 BeV. Existen además planes aun más ambiciosos que requieren la construcción de aceleradores que alcancen niveles de energía de hasta 1.000 BeV.

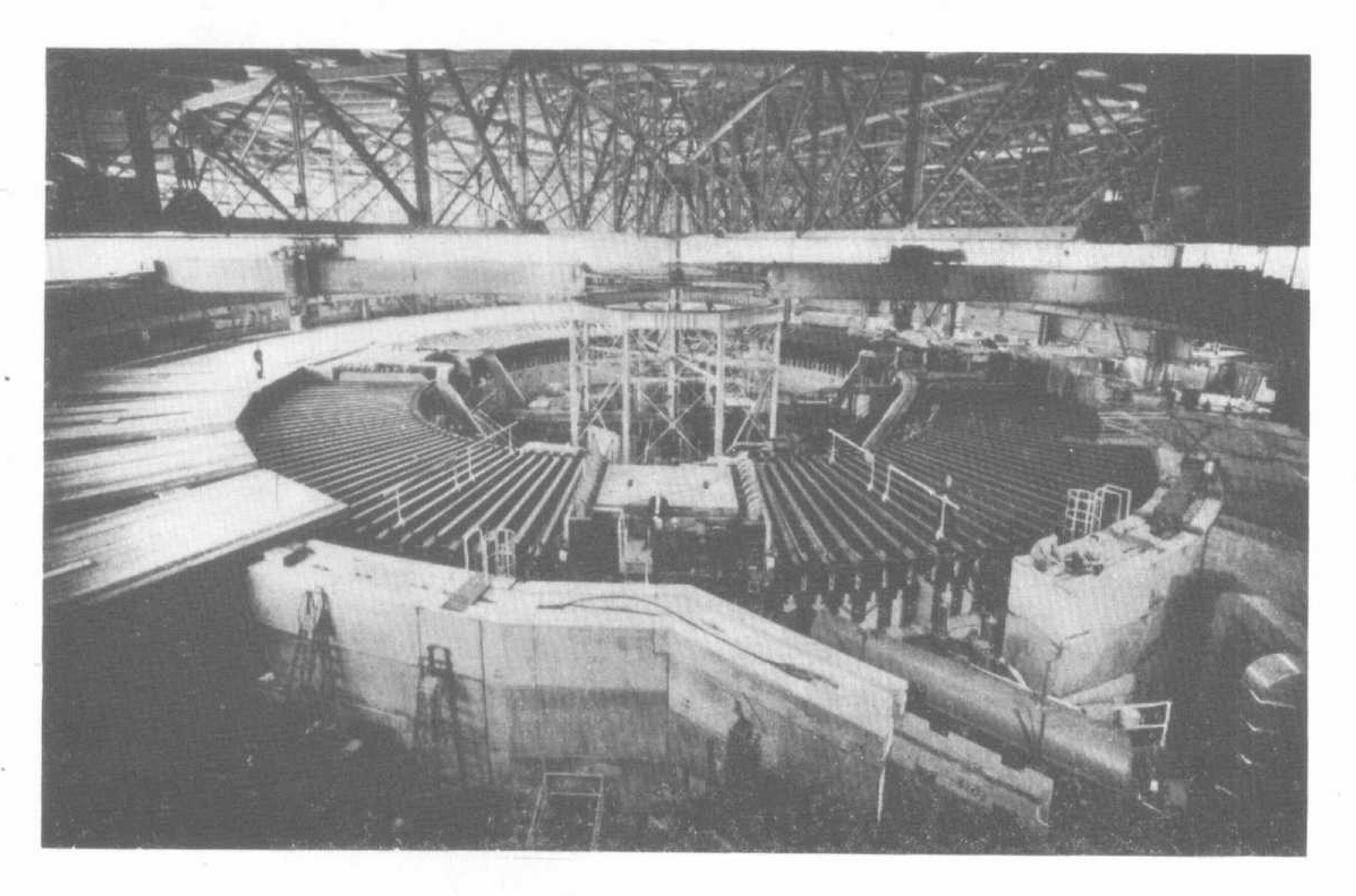


Fig. 3-14. Desintegrador gigante de átomos Bevatrón existente en el Lawrence Radiation Laboratory, Berkeley. La máquina acelera protones hasta 6,2 BeV. En la parte derecha inferior está situado un acelerador lineal que inyecta protones en el interior de una cámara en el imán gigante circular que pesa 10.000 toneladas y cuyo diámetro es de 36,576 m. Las partículas recorren circularmente la cámara 4.000.000 de veces en 1,8 seg; viajan más de 480.000 km, distancia superior a la existente entre la tierra y la luna. Con esta máquina se han descubierto el antiprotón y otras partículas.

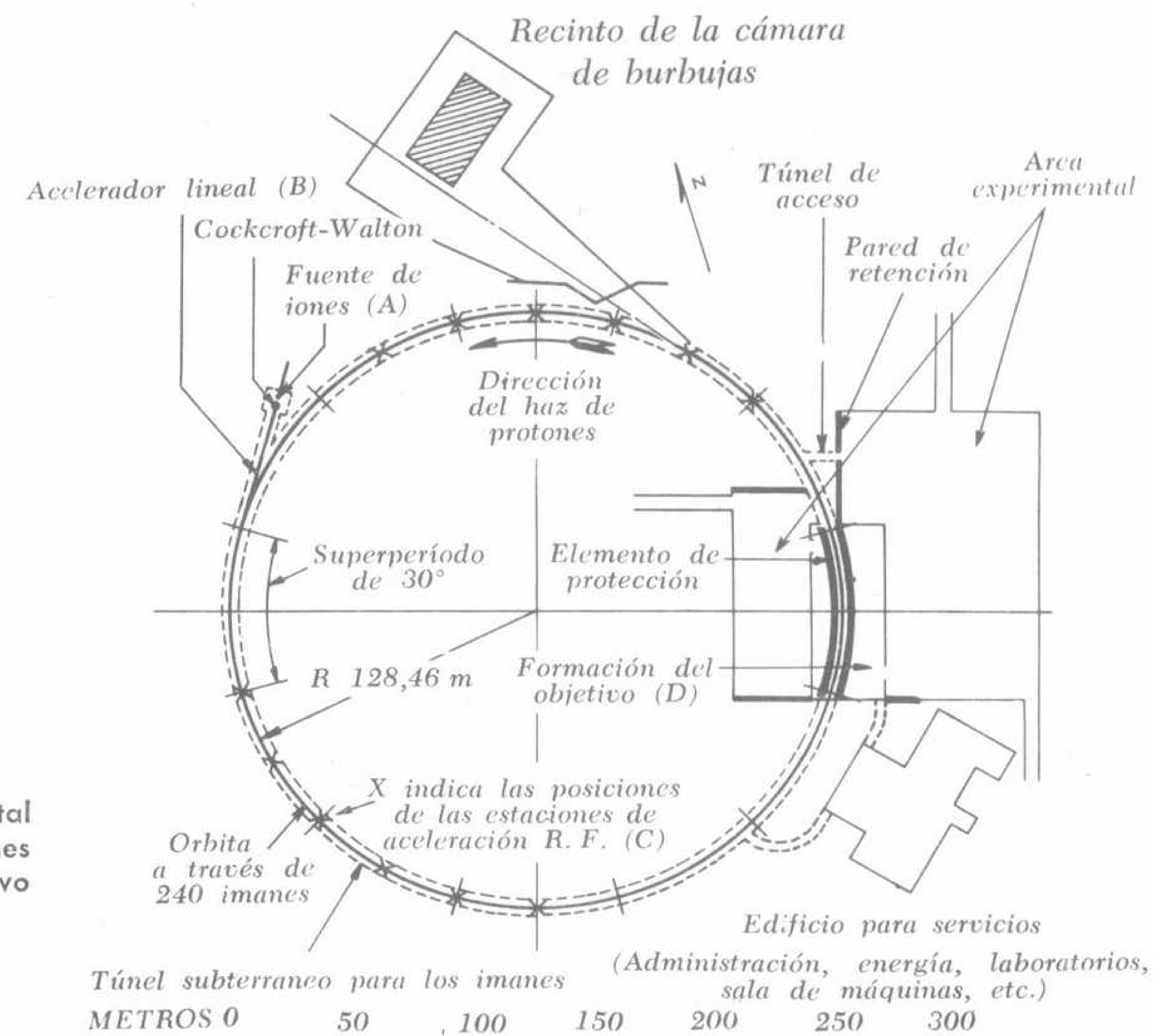


Fig. 3-15. Vista horizontal del sincrotón de protones de gradiente alternativo de 33 BeV.

5 REACCIONES PRODUCIDAS MEDIANTE ACELERADORES

Ya sabemos algo respecto a los aceleradores lineales y circulares pudiendo entonces continuar con nuestra descripción de transformaciones nucleares y estudiar algunas de las reacciones posibles mediante el bombardeo de diversos objetivos con protones de alta energía, deuterones y partículas alfa. Para mayor sencillez, omitiremos las variaciones de energía que tienen lugar.

Una reacción nuclear típica que comprende protones de alta velocidad, puede escribirse de la siguiente manera:

$$^{1}_{1}H + ^{27}_{13}Al$$

$$^{28}_{14}Si + \gamma \text{ (rayos gamma)}$$

en la cual se forma un elemento totalmente diferente o *núclido*. La reacción puede considerarse como tipo p-γ (es decir, reacción en la cual se utiliza un protón como proyectil y la radiación gamma acompaña la reacción). Esto también se conoce como ejemplo de *captura radioactiva*.

Otra reacción inducida mediante protones se representa mediante la ecuación:

$$^{1}_{1}H + ^{19}_{9}F \rightarrow ^{16}_{8}O + ^{4}_{2}He$$

A diferencia de la primera, esta reacción comprende la formación de dos núclidos diferentes, en lugar de una absorción o captura de la partícula invasora.

Una reacción d-α (deuterón-alfa) típica comprende la transmutación de oxígeno en nitrógeno, con la liberación de una partícula alfa:

$$^{2}_{1}H + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He$$

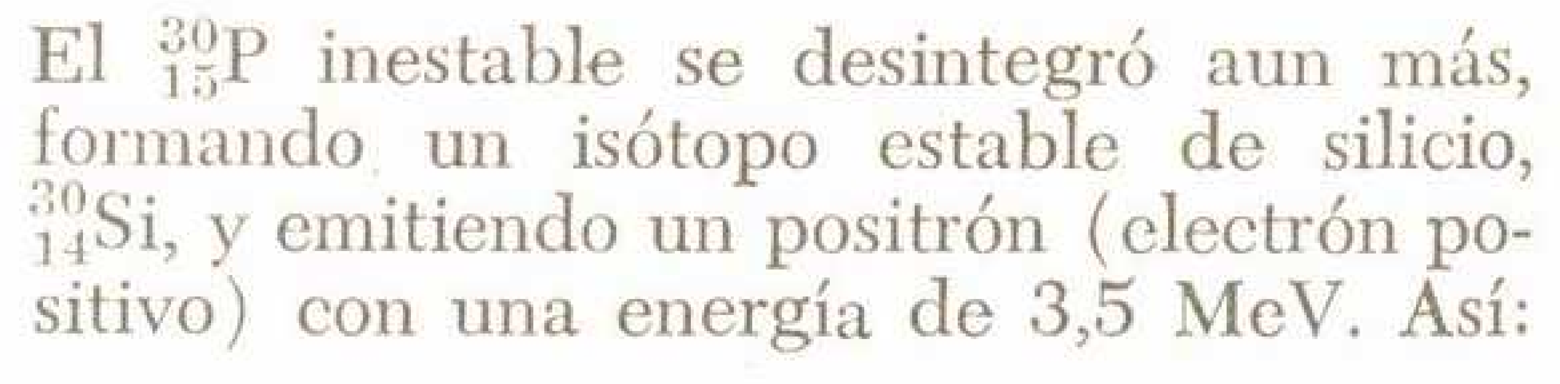
Una reacción d-p (deuterón-protón) típica cambia una forma de litio en otra forma isótopa:

$$^{2}_{1}H + ^{7}_{3}Li \rightarrow ^{8}_{3}Li + ^{1}_{1}H$$

Ya nos hemos referido al descubrimiento del neutrón por James Chadwick (Capítulo 2). La reacción siguiente representa la formación de neutrones por la interacción de partículas alfa no aceleradas con berilio:

$$^{4}_{2}He + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

El $^{30}_{15}P$ inestable se desintegró aun más, formando un isótopo estable de silicio, $^{30}_{14}Si$, y emitiendo un positrón (electrón positivo) con una energía de 3,5 MeV. Así:



$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{+1}e$$

La fig. 3-16, parte (B), representa la

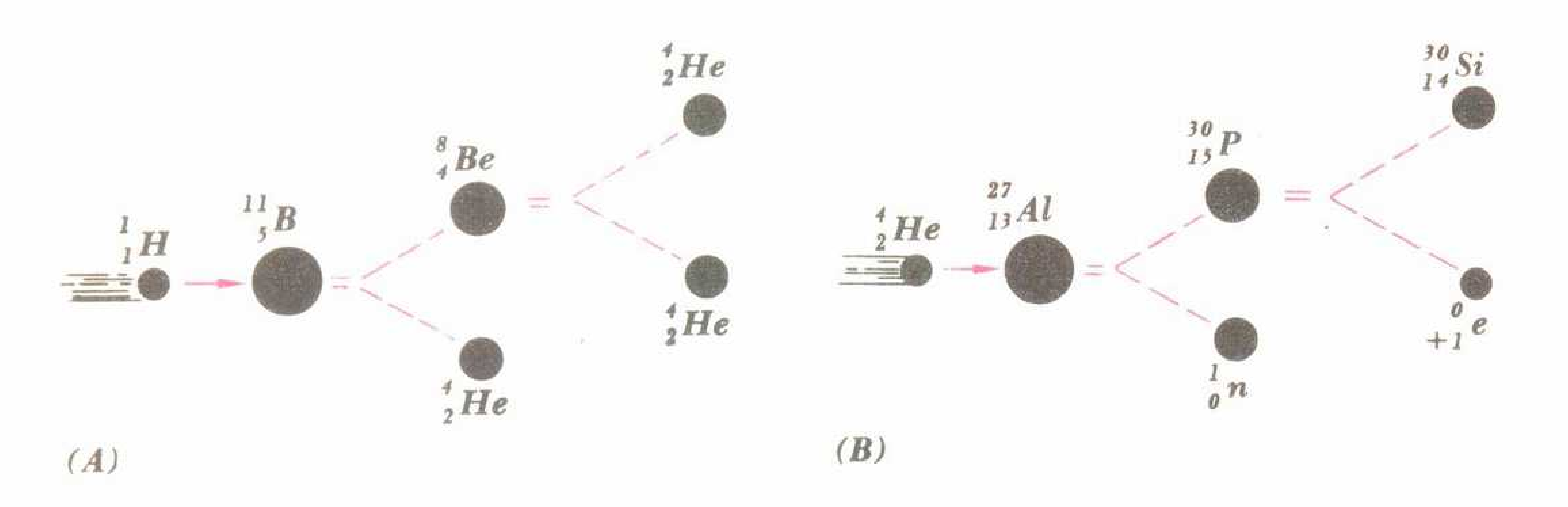


Fig. 3-16. (A) Desintegraciones nucleares múltiples o sucesivas. (B) Representación esquemática del experimento de radioactividad inducida de Joliot-Curie.

reacción completa o compuesta en forma esquemática. Puede escribirse de la siguiente manera:

$$^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e$$

Un ejemplo interesante de transformación nuclear sucesiva o *múltiple* responde a la reacción:

$$^{1}_{1}H + ^{11}_{5}B \rightarrow ^{8}_{4}Be + ^{4}_{2}He$$

$$\rightarrow ^{4}_{2}H + ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$$

Esta reacción se ilustra en forma esquemática en la fig. 3-16, parte (A).

6 RADIOACTIVDAD ARTIFICIAL O INDUCIDA

Al bombardear una lámina de aluminio con partículas alfa, Irene Joliot-Curie y su marido Frederick Joliot, descubrieron en 1934 que el producto inmediato de la reacción, es decir, un isótopo del fósforo, $^{30}_{15}P$, presentaba radioactividad que continuaba aun después del bombardeo. La reacción inicial progresó de la siguiente manera:

$$^{4}_{2}He + ^{27}_{13}Al \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

Denominamos al producto intermedio, $^{30}_{15}P$, *radiofósforo,* o fósforo radioactivo, fabricado por el hombre. El primer *radioisótopo* producido de este tipo fue un emisor de positrones, que tenía una vida media de aproximadamente 2,5 minutos. Desde entonces, ha sido posible obtener cerca de 2.300 radioisótopos diferentes de vida media variable, números de masa y tipos de productos de emisión de los cuales 18 de ellos son los de mayor demanda. El carbono 14, el estroncio 89 y el itrio 90, todos ellos producidos en reactores, son *emisores beta* puros; el estaño 113, el bario 137 y el manganeso 54 son *emisores gamma.* Recientemente, se produjo en un reactor nuclear el primer *emisor alfa* artificial denominado polonio 210. Más adelante en este capítulo se describirán con mayor detalle isótopos radioactivos y su utilización.

7 RADIACION Y FISICA SANITARIA

En relación con los materiales radioactivos naturales, así como también con los radioisótopos producidos en los reactores, es importante tener presente que las radiaciones de alta energía pueden dañar en forma seria el organismo humano. La Comisión de Energía Atómica de los EE.UU. de Norteamérica estuvo en condiciones de llevar a término un programa de 20 años de producción e investigación con una cantidad sorprendentemente baja de accidentes "atómicos", mediante una insistencia en los controles periódicos de los aparatos sospechosos, productos químicos, equipos de almacenamiento, ropa del personal y residuos radioactivos.

El *índice de radioactividad* se mide en *curies* (Ci). (Un curie corresponde a 3,7 $\times 10^{10}$ desintegraciones nucleares por segundo.) El *milicurie* (mCi) y el *microcurie* (μCi) son submúltiplos convenientes de la unidad más grande. En forma arbitraria, decimos que la actividad de una muestra radioactiva es "baja" si está entre un μCi y un mCi, que es "intermedia" si está comprendida entre un mCi y cien mCi, y "alta" si es superior a cien mCi. La *actividad específica* de un material se expresa en *Curies por gramo,* o *milicuries por* miligramo. La actividad específica del radio puro es de aproximadamente un Ci/g. La del P^{32}, es de aproximadamente 50 μCi/g.

La cantidad o *dosis total* de radiación se mide en *roentgens* (r). Se puede definir al roentgen como la cantidad de radiación que produce por ionización, una carga de una unidad electrostática en 1 cm^3 o 0,001293 g de aire seco a 0°C y a una presión de 760 mm de Hg (1 atmósfera). En términos estrictos, el roentgen



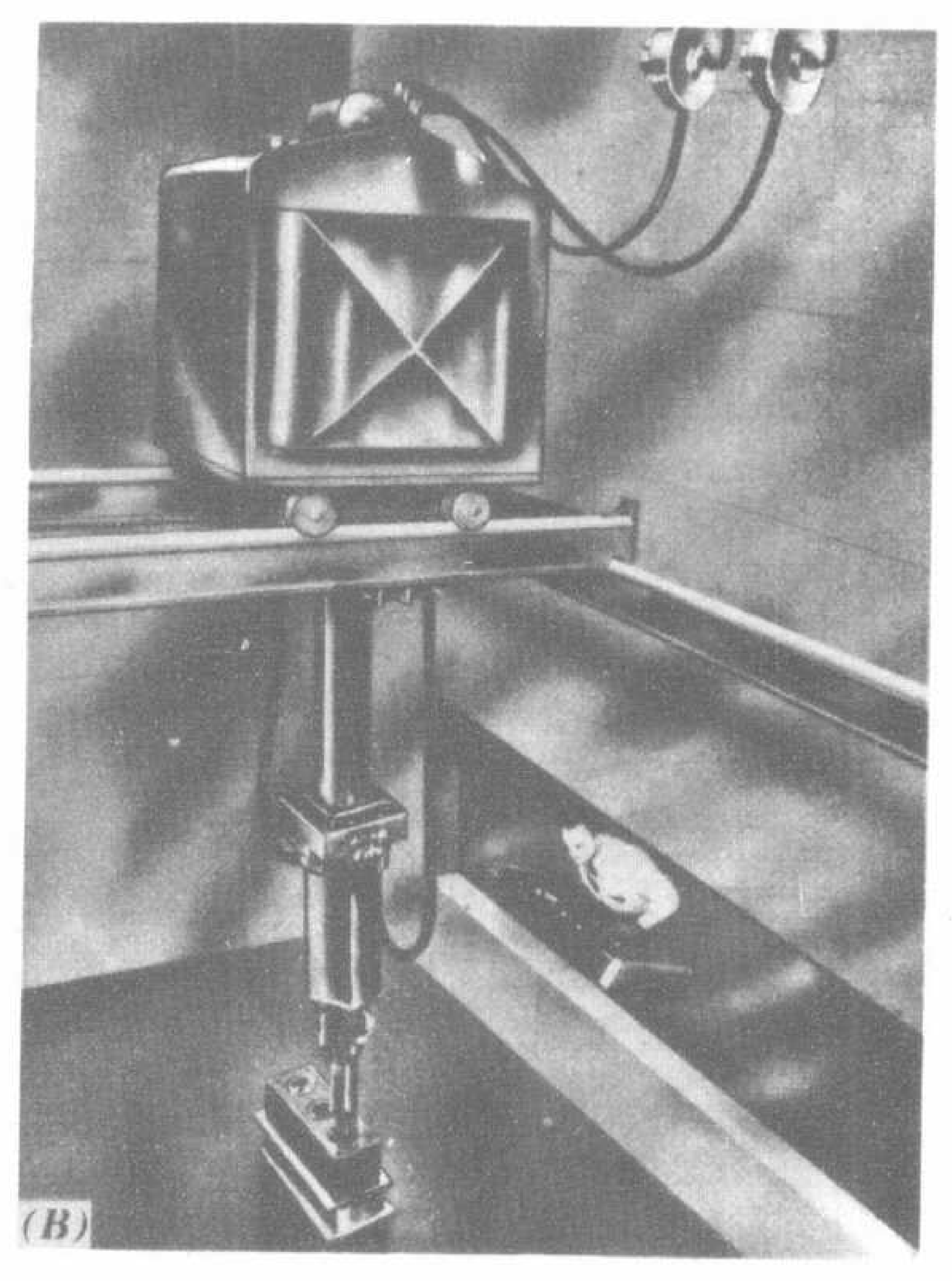


Fig. 3-17. (A) Detector de radiaciones de prueba para medir la radioactividad a cierta distancia. El isótopo radioactivo que se manipula está rodeado por barras de plomo. (B) Manipulador hidráulico para manejar a distancia materiales radioactivos.

se aplica sólo a los rayos X y la radiación gamma que atraviesa el aire. Ya no se lo considera útil en la física de la salud.

Se debe hacer notar que *dosis total* es el efecto de radiación *integrado* medido durante un lapso de exposición especificado. El *índice de dosis* es una medida de cuán rápidamente esta energía de radiación es absorbida *por unidad de tiempo*. Una unidad conveniente para este índice de absorción de energía es el *roentgen por hora* (r/h), o miliroentgen por hora (mr/h). Si se supone a este índice constante y se lo multiplica por el tiempo de exposición expresado en horas, el resultado es la dosis total en roentgens o miliroentgens. Así, un índice de dosis de 20 mr/h mantenido durante un período de 5 horas originará una absorción total de energía (o dosificación) de 20 × 5, o sea 100 mr.

Se han propuesto nuevas unidades de dosificación total para tener en cuenta la absorción de la energía en el *tejido del organismo humano*, más bien que en el aire. La unidad *rep* (de la expresión inglesa roentgen-equivalent-physical) se empleó en un primer momento para indicar una absorción de energía de 93 erg/g del tejido del organismo humano, y posteriormente fue reemplazada por la unidad *rad* (radiación) que corresponde a 100 erg/g de tejido. Más tarde se adoptó el *rem* (de la expresión inglesa roentgen-equivalent-mammal) para indicar la cantidad de *cualquier* radiación que produce el mismo efecto biológico que un rad. En el caso de los rayos X, o rayos gamma, 1 rem = 1 rad, pero para las partículas alfa, con una eficacia biológica relativa de 10 a 20, una dosificación de 100 rad produce el mismo efecto que 1.000 a 2.000 rems. El rem es de uso corriente.

La protección de las personas en el campo de la energía atómica se basa actualmente sobre un nuevo concepto: el de la *dosificación máxima permisible* acumulada (dmp), que tolera un índice máximo de 0,1 rem/semana, o sea aproximadamente 5 rem/año, siendo en consecuencia la dosificación máxima *total* para un período de trabajo de, por ejemplo, 25 años, 5 × 25, o sea 125 rem. Debido a que esta cifra es la máxima que puede ser tolerada según un proceso acumulativo, cualquier exposición imprevista superior al índice permitido debe por necesidad reducir la cantidad total "presupuestada". El índice de radiación permisible ha sufrido una reducción permanente desde 1928 a la fecha: en aquel año era de aproximadamente 60 rem/año siendo en la actualidad de 5 rem/año. A la población en general, en comparación con el personal profesional, se le permite a lo sumo aproximadamente 1/10 o sea un máximo de 0,5 rem/año. En esta cifra se deben incluir las exposiciones tales como las radiografías de tórax con rayos X, los exámenes dentales y los diagnósticos fluoroscópicos.

La fig. 3-17, parte (A), ilustra el proceso de la medición de la radioactividad con un detector de radiación de sonda larga, estando revestido el material que se está investigando con barras de plomo. En la parte (B) de la fig. 3-17, se ilustra un manipulador de los denominados hidráulicos empleado para trabajar a distancia con materiales radioactivos. La fig. 3-18 ilustra un medidor de búsqueda de radiación. Obsérvese que la escala está graduada en miliroentgens por hora.

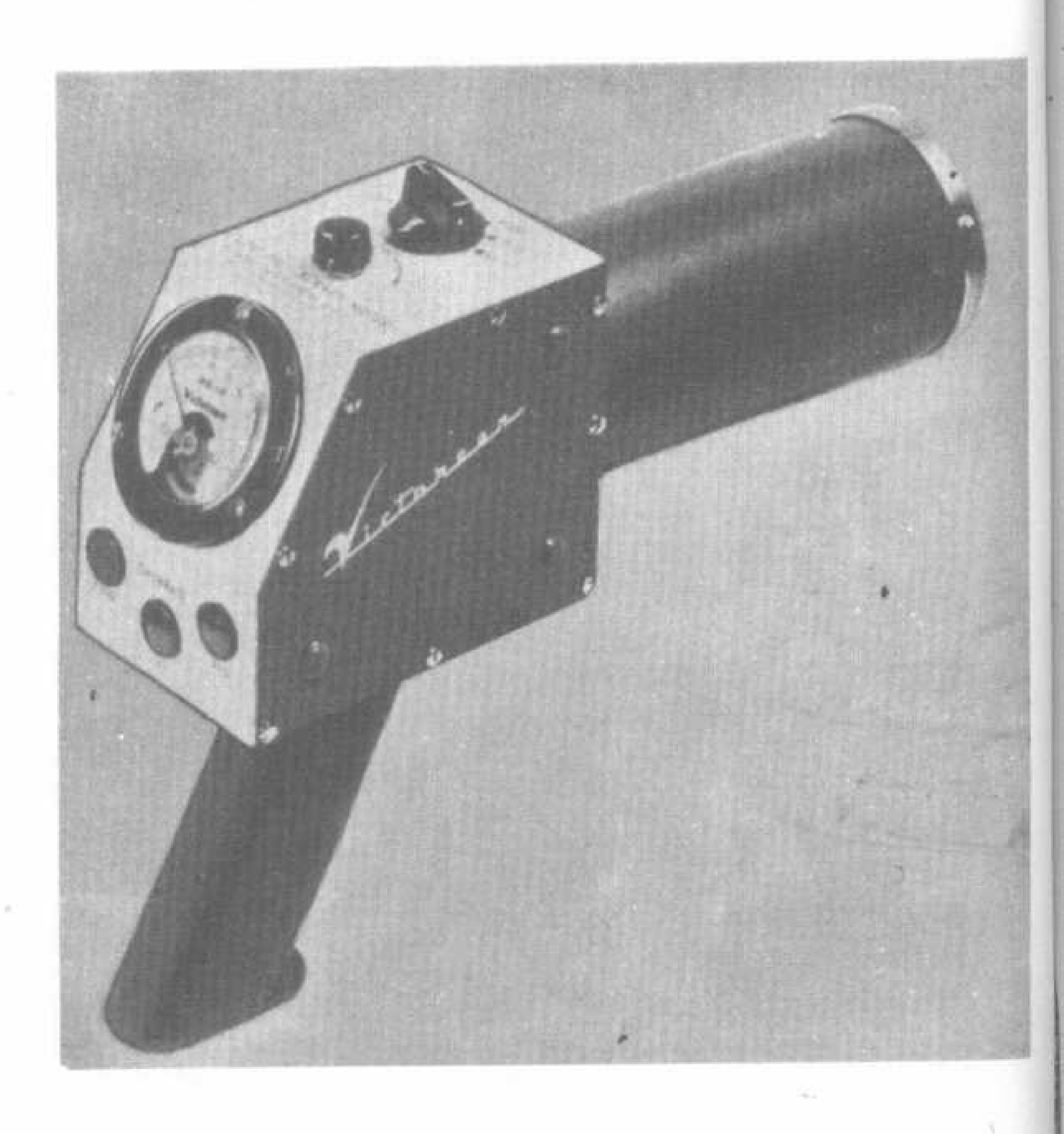


Fig. 3-18. Instrumento localizador de partículas alfa, beta y gamma (el Cutie Pie).

8 CONTADORES Y DETECTORES

Las radiaciones nucleares no pueden detectarse mediante los sentidos humanos. Así pues, hemos considerado en el Capítulo 2 el electroscopio de hojas, la cámara de nube y la película fotográfica sensibilizada en forma especial. A continuación estudiaremos la *cámara de ionización*, el *contador de Geiger-Müller*, el *contador de centelleo*, las *cámaras de burbuja y chispa*, y el *detector de estado sólido*.

La cámara típica de ionización (fig. 3-19 parte A), es un recipiente metálico cilíndrico que está lleno con un gas fácilmente ionizable tal como el argón o el criptón y que posee (a lo largo de su eje) un delgado alambre de tungsteno. La cubierta externa está conectada al terminal negativo de una batería y el electrodo central al terminal positivo. Las radiaciones que atraviesan la cámara de paredes delgadas (o en el caso de las partículas alfa, una ventana de mica o "nylon" especial) ionizan al gas existente en la cámara, creando *pares de iones* que actúan como transportadores de la corriente. A potenciales bajos (región *A* de la fig. 3-19 B), los iones con cargas contrarias tienden a recombinarse y la carga neta reunida en los electrodos es puequeña. Cuando se hace funcionar la cámara en la región *B*, los pares de iones se mueven lo suficientemente rápido como para evitar la recombinación y envía impulsos de más amplitud al electrómetro o al amplificador de tubos al vacío. Además, la magnitud de los impulsos no se altera por las variaciones de tensión, sino únicamente con la energía de las partículas de ionización que entran a la cámáara. La región *B* es la *región de ionización* del instrumento.

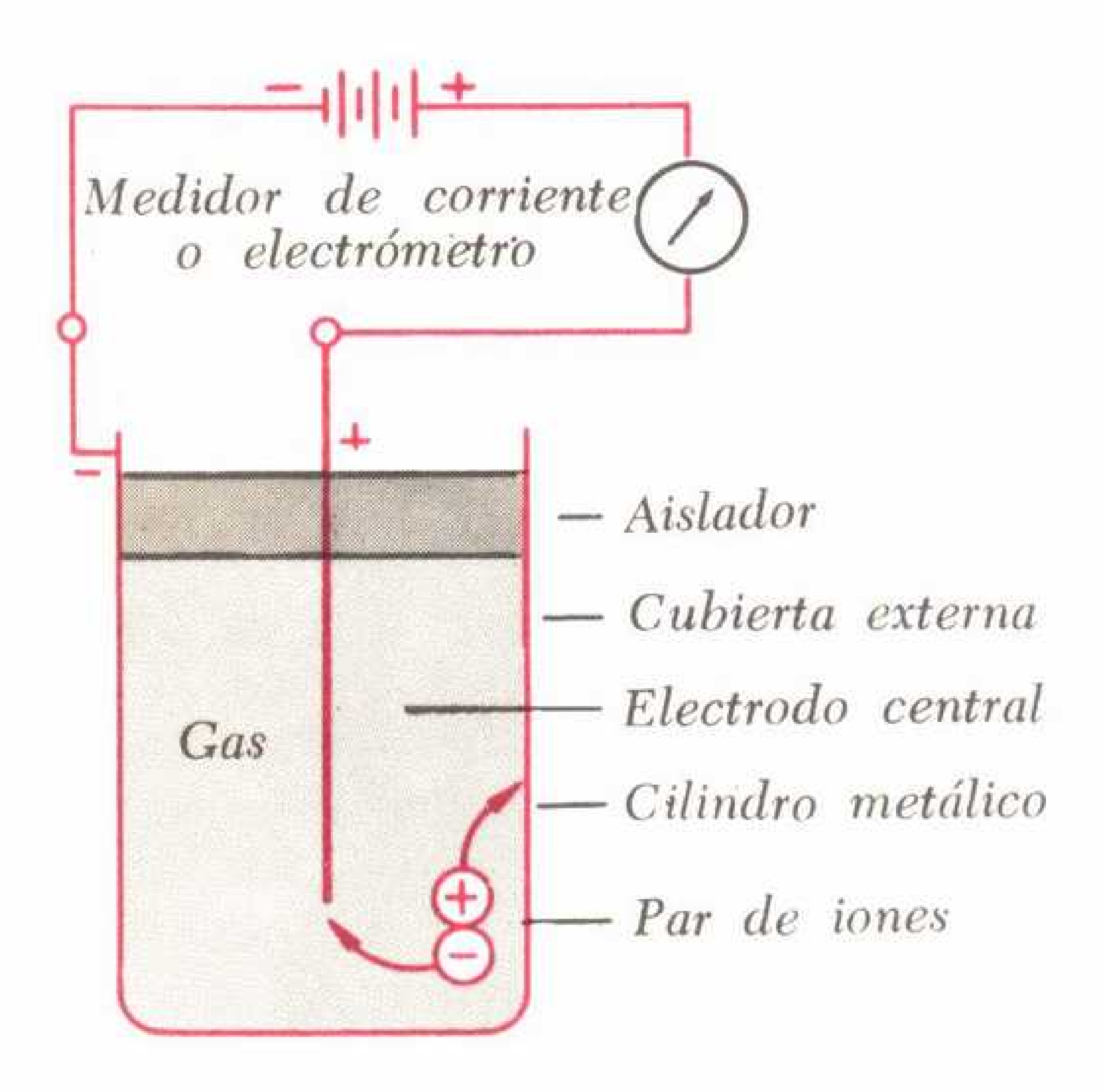
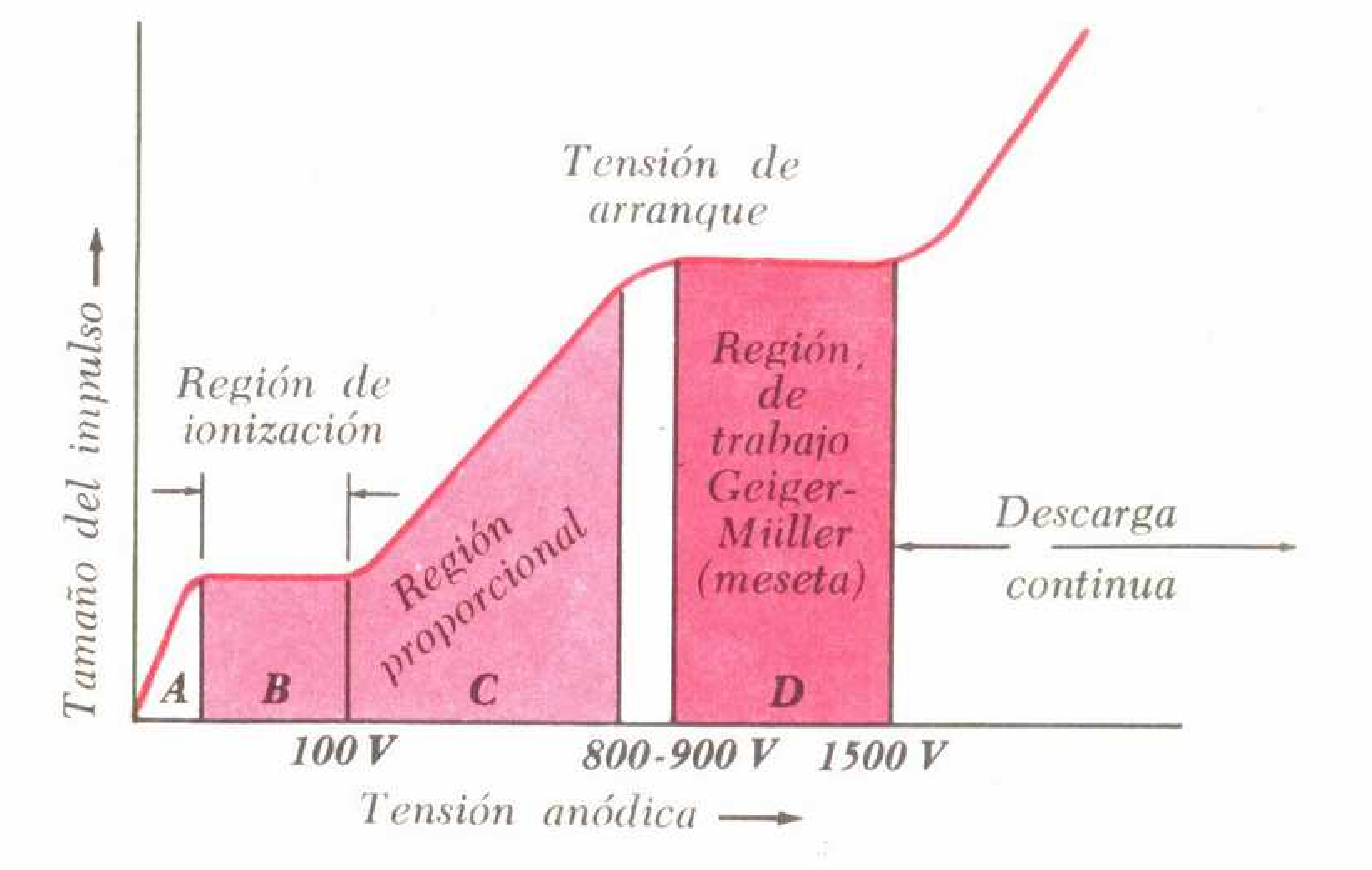
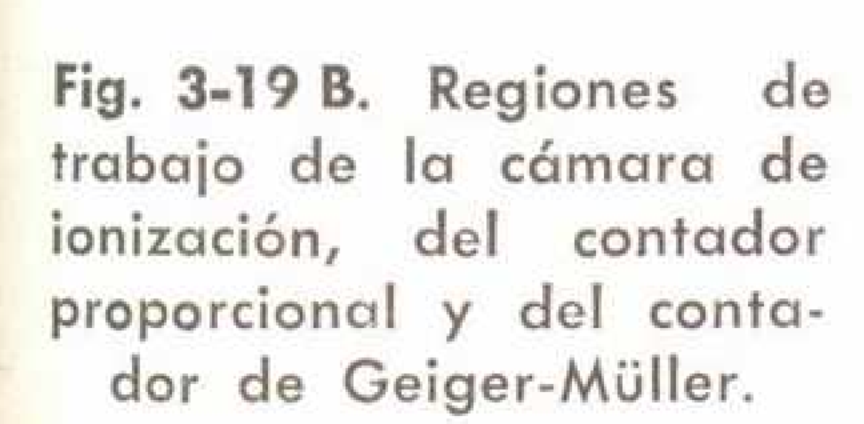


Fig. 3-19 A. Cámara de ionización sencilla.




Fig. 3-19 B. Regiones de trabajo de la cámara de ionización, del contador proporcional y del contador de Geiger-Müller.

Si se eleva el potencial hasta una cifra aun más alta (que comienza en la región *C* del diagrama), los iones primarios producen una cadena de pares de iones sucesivos debido al denominado efecto de

"avalancha" de Townsend. La amplificación interna resultante puede llegar a 10.000, con el resultado de que ahora el

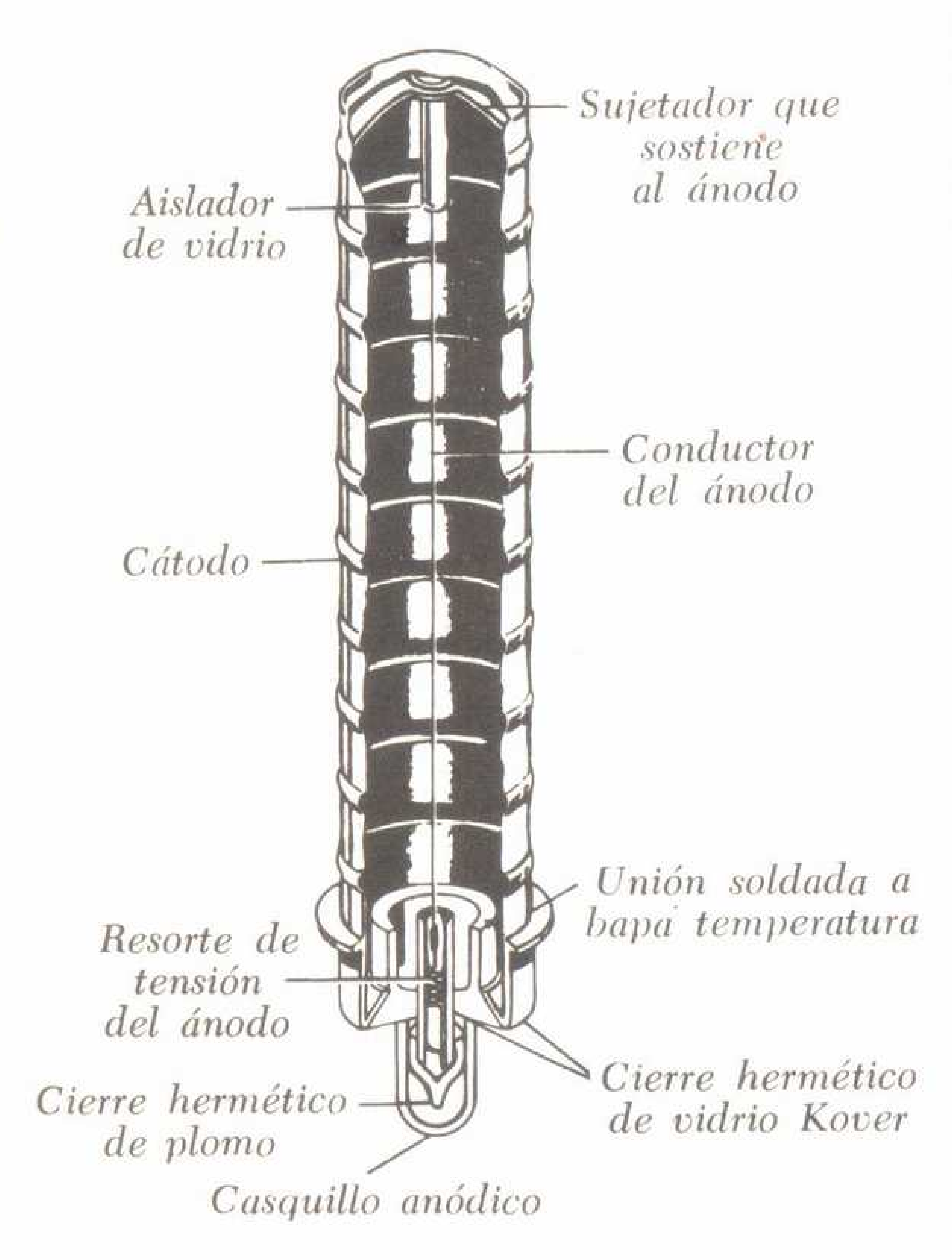


Fig. 3-20. Tubo contador de aluminio de paredes delgadas para la detección de partículas beta y rayos gamma.

impulso primitivo ha aumentado en forma substancial. La magnitud del impulso comienza a variar con la diferencia de tensión de trabajo así como también con la ionización primaria producida por las partículas cargadas en forma accidental. El contador que trabaja en esta región se dice que es un *contador proporcional.* Cuando se lo utiliza de esta manera, se llena al instrumento con metano y con aproximadamente un 20 % de argón. El primero para mejorar la estabilidad y el segundo para elevar el *factor de amplificación.* La amplitud del impulso es suficientemente grande como para hacer funcionar un amplificador simple y ciertos contadores mecánicos. Las partículas alfa producen impulsos de mucha amplitud y en consecuencia se las puede distinguir de otras radiaciones. Los de las partículas beta y gamma no pueden diferenciarse fácilmente.

El contador Geiger-Müller (G-M), que fue utilizado por primera vez en 1908 y mejorado en 1928, es una forma especial de una cámara de ionización que trabaja a una tensión considerablemente más alta (Región *D* de la fig. 3-19 B). La "avalancha" de Townsend se esparce ahora a lo largo de *toda la longitud* del electrodo central. El tamaño del impulso es independiente de la ionización primaria, de manera que aun una única partícula beta puede generar una descarga total. El factor de amplificación del gas puede ser tan alto como 10^8. La mezcla típica de llenado (nueve partes de argón y una parte de vapor de alcohol etílico), está a una presión de 50-100 mm de Hg. Se hace funcionar al instrumento dentro de una gama de tensiones comprendida entre aproximadamente 800 y 1.500 voltios. Por encima de esta tensión el tubo genera una descarga continua, lo que debe evitarse por completo. La fig. 3-20 ilustra una

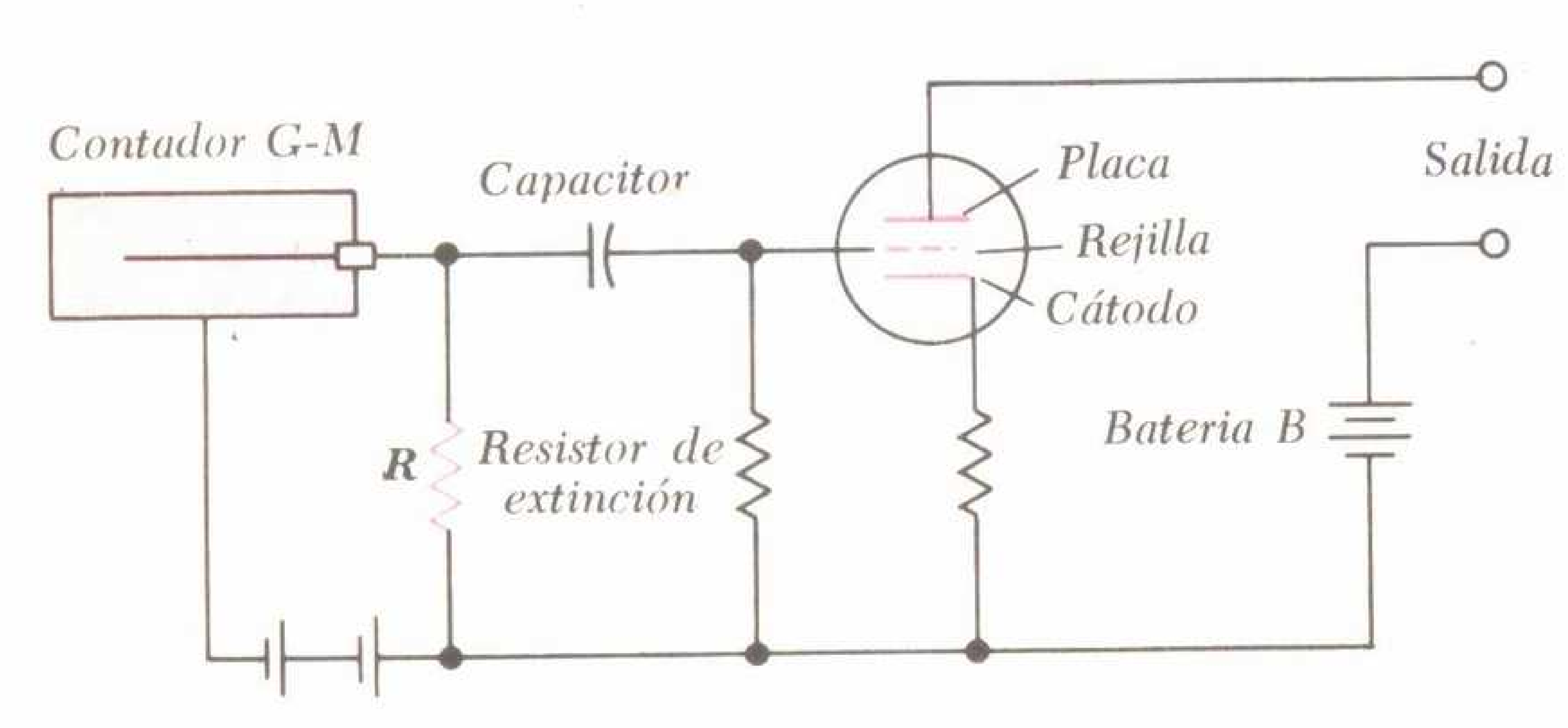


Fig. 3-21. Contador de Geiger-Müller con extinguidor externo y amplificador de válvulas de vacío.

vista en corte de un contador beta-gamma G-M de paredes delgadas.

El contador Geiger-Müller cuenta en forma rápida y eficiente. Sin embargo, una vez que se ha recibido un impulso debe terminar en forma rápida, si el contador tiene que estar listo para una nueva respuesta. En consecuencia, se debe agregar un material de *extinción* al gas existente en el tubo (en el contador denominado de *autoextinción*) para bloquear una posterior ionización. Para esta finalidad, se utilizan vapores alcohólicos, metano, etano y otras mezclas.

Aun otra forma de extinguir al tubo consiste en colocar una alta resistencia externa (del orden de $10^9\ \Omega$) en serie con el tubo y la fuente de alimentación. El paso de corriente a través del resistor produce una caída *IR* que reduce el potencial disponible por debajo del valor de disparo o umbral. Luego se restablece la tensión a tiempo para el impulso siguiente. La fig. 3-21 ilustra las conexiones de un contador con *extinción externa* y su amplificador de tubos de vacío.

Si los impulsos ionizantes llegan a una velocidad demasiado alta, la acción de contar se vuelve imposible salvo que se agregue un equipo especial conocido como *escalímetro* al sistema de medición. Un escalímetro *binario* (fig. 3-22) cuenta cada 2—, 4—, 8— o aun 64— impulso. Un escalímetro de *décadas* permite contar a cada 10, 100, 1.000, o aun 100.000 impulsos.

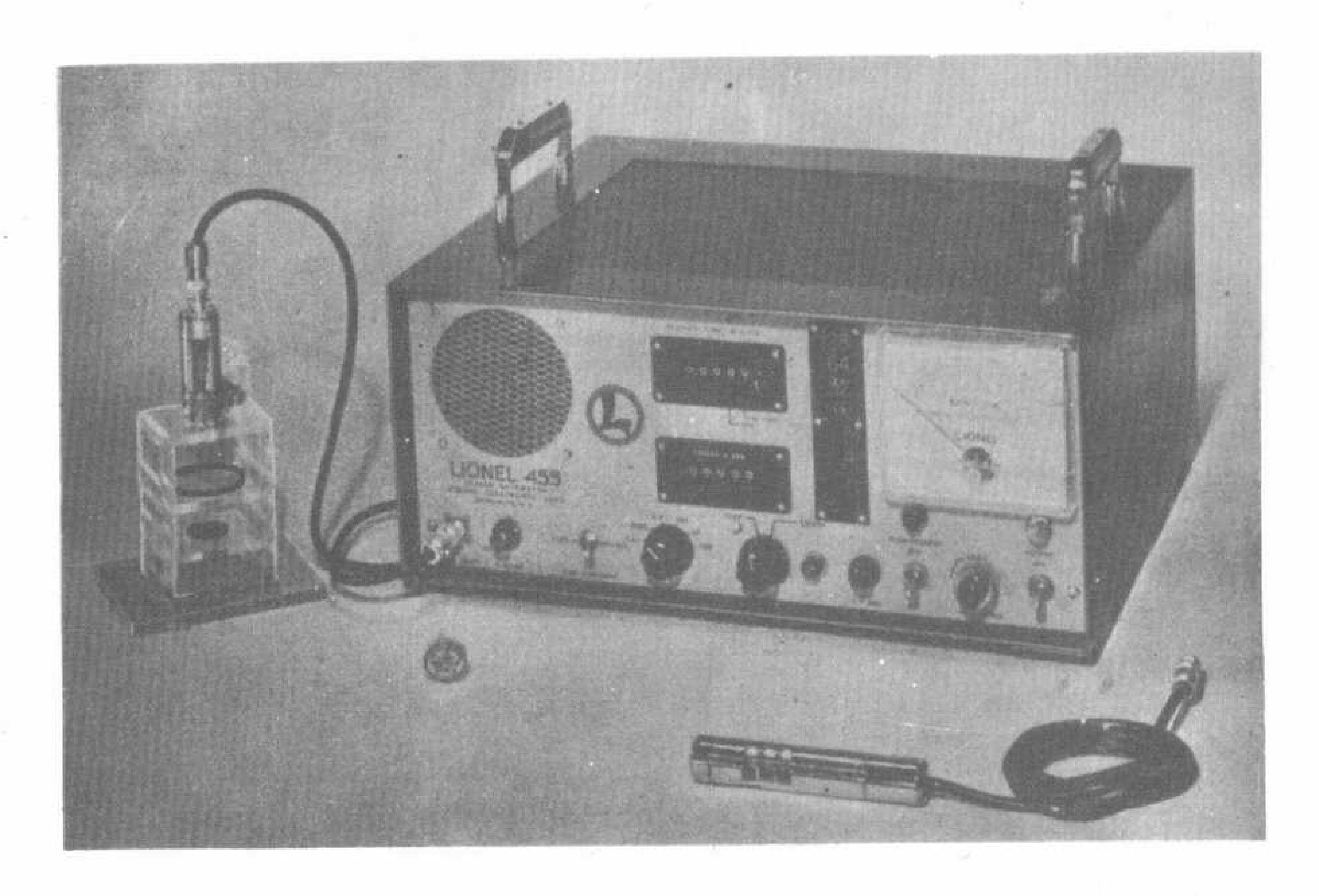


Fig. 3-22. Escalímetro binario.

Los contadores de Geiger-Müller se construyen de acero inoxidable, aluminio o vidrio, y el espesor de la pared se establece de acuerdo con la naturaleza de las partículas que se han de detectar. Un espesor que corresponde a una superficie de la pared de 300 mg/cm^2 deja pasar fácilmente rayos gamma (γ), pero bloquea las partículas alfa (α) y beta (β). Una pared aun más delgada y estar equipado todos los rayos gamma y la mayoría de las partículas beta, pero las partículas alfa quedan excluidas. Para recibir a las partículas alfa, el contador debe tener una pared aun más delgada yestar equipado con una ventana de mica, acero inoxidable, o Pliofilm, con una densidad de sólo 5 mg/cm^2. Además, la fuente de partículas alfa debe estar cerca de la ventana, debido a que su alcance en el aire es extre-

Unidad contadora de velocidad
Cilindros diseminadores
Dos fuentes de radiación
Sonda y detector de Geiger-Müller
Plomo Aluminio Cartulina
Láminas absorbentes
Tablilla calibrada para experimentos
Manual de Instrucción

Fig. 3-23. Método de enseñanza de radioactividad.

madamente corto. Para detectar neutrones lentos o *térmicos*, el contador debe llenarse con gas *trifluoruro de boro* (F_3B) a presión, o revestir sus paredes con carburo de boro (ambos son ricos en cuanto al isótopo B^{10}). La reacción entre los neutrones y el boro

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{10}_{5}B \rightarrow {}^{7}_{3}Li + {}^{4}_{2}He + Q(2{,}5\ \mathrm{MeV}) $$

libera partículas alfa, que a su vez producen la ionización inicial necesaria.

La fig. 3-23 ilustra un sistema completo para el estudio de la radioactividad en el laboratorio. El aparato incluye un indicador contador de la velocidad, un tubo Geiger y una sonda (que responde a las radiaciones beta y gamma), un conjunto de láminas absorbentes y cilindros que asparcen la radiación, dos fuentes de radiación y una tablilla calibrada para el estudio de la ley de la recíproca de los cuadrados que relaciona la radioactividad en cuentas/minuto con la distancia de la sonda respecto a la fuente (fig. 3-24).

El contador de centelleo es un instrumento particularmente eficaz y sensible, varias veces más sensible a los rayos gam-

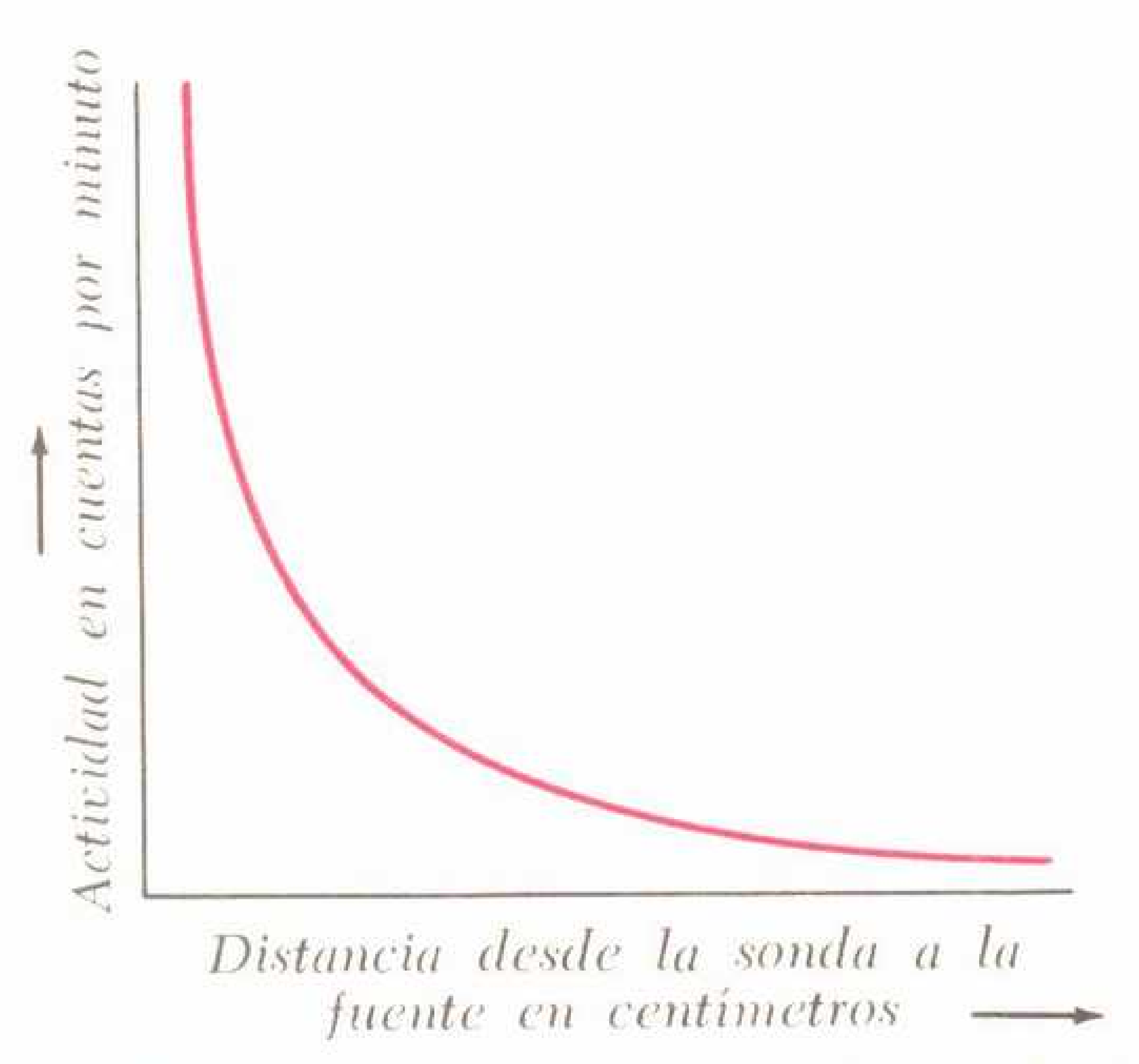


Fig. 3-24. Ley de la recíproca de los cuadrados para una fuente de radiación que se supone puntual y dimensiones de la probeta detectora, pequeñas en comparación con las distancias existentes entre la probeta y la fuente. La cuenta base debe restarse de la cuenta observada para obtener una medida real de la actividad de la muestra.

ma que el mejor contador G-M. Se basa en el principio de que ciertos materiales fluorescentes emiten destellos de luz cuando una radiación choca con ellos. Para esta finalidad, se utiliza una variedad de elementos sensibles a las radiaciones, o *fosforescentes,* tales como el sulfuro de cinc activado con plata, el sodio activado con talio, el potasio o los cristales de ioduro de cesio, el antraceno, o el estilbeno.

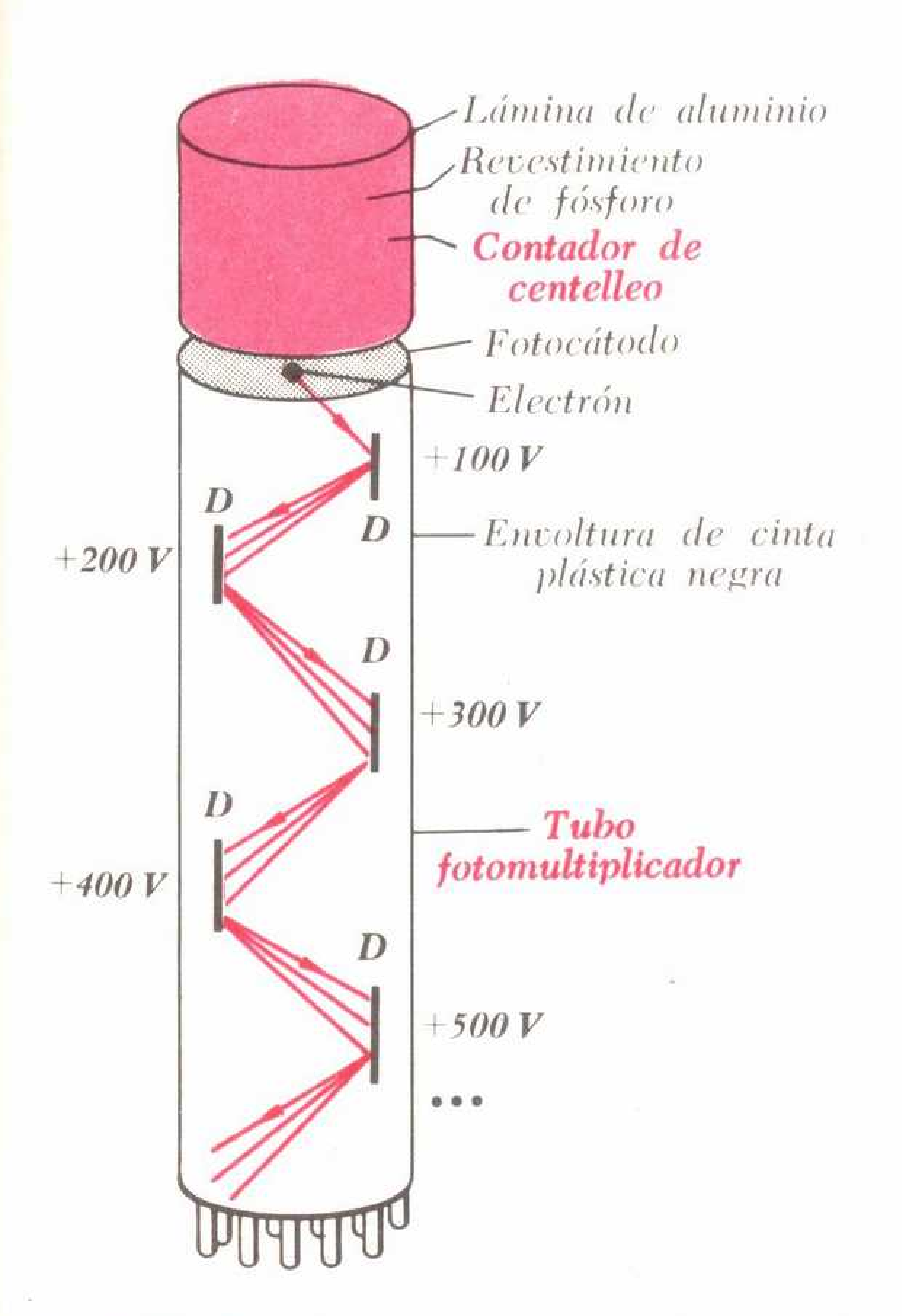


Fig. 3-25. Contador de centelleo y fotomultiplicador asociado. Una partícula energética que atraviesa la cámara, hace que el fósforo emita un destello de luz. La luz choca contra la superficie del fotocátodo y emite uno o varios electrones primarios (fotoelectrones). Los **dinodos** (D en el diagrama)cuyo potencial positivo va en aumento, emiten electrones secundarios hasta que se obtiene una amplificación total de aproximadamente 10^6 o más.

Los detellos de luz se reciben en un *tubo fotomultiplicador* ópticamente acoplado, que convierte la luz en una serie de 10 o más etapas, en una descarga electrónica altamente amplificada. Es totalmente factible la multiplicación del impulso inicial por un millón o aun más. La amplificación externa eleva la magnitud de la respuesta a niveles aun más altos.

La fig. 3-25 es un diagrama de un contador de centelleo de cristal en contacto óptico con su tubo fotomultiplicador. Un contador de *pozo* de centelleo (fig. 3-26) ofrece una geometría adecuada para el estudio de la radioactividad en pequeñas muestras en tubos de ensayo.

La *cámara de burbujas* (fig. 3-27), inventada por Donald Glaser en 1952, consiste esencialmente en una cámara de nube formadora de trayectorias que no posee el lento período de recuperación del instrumento precedente.

En lugar de emplear un vapor sobreenfriado, Glaser utilizó un líquido (en un principio éter dietílico), calentado bajo presión y llevado hasta una temperatura

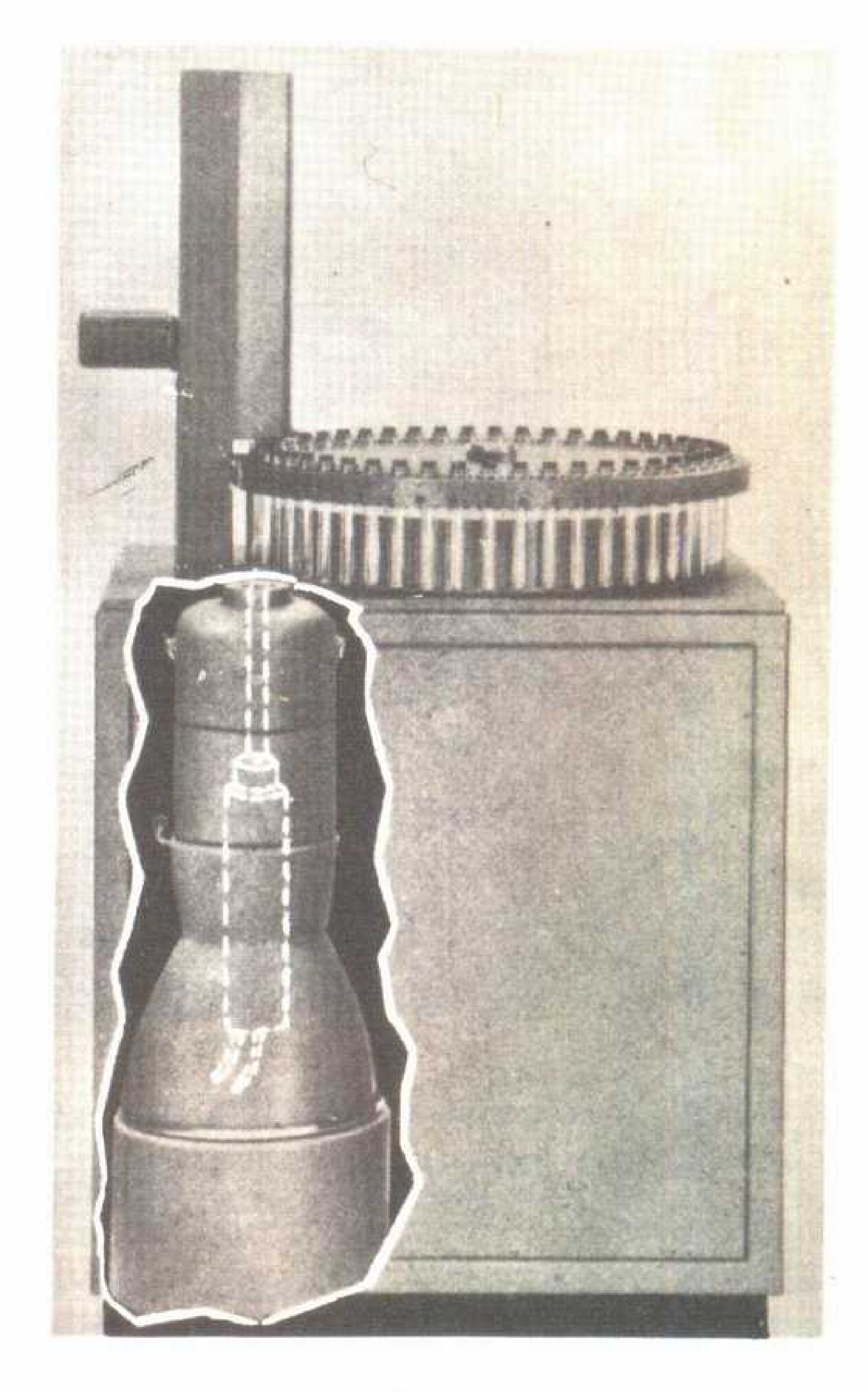


Fig. 3-26. Contador de pozo de centelleo para medir emisiones gamma.

superior a su punto de ebullición normal. Una liberación repentina de la presión hacía que el líquido comenzara a hervir en los puntos de perturbación creados como consecuencia de las partículas cargadas que lo atravesaban. Así, la traza de las burbujas se convirtió en la de las partículas, que podía fotografiarse fácilmente (fig. 3-28 A, y 3-28 B, partes a y b). Posteriormente, se comprobó que el hidrógeno líquido con sólo una especie de átomos era superior al éter y el tamaño de las cámaras de burbujas creció desde la primera botella de Glaser, de 2,54 cm de diámetro hasta la cámara de 203,2 cm que se instaló como "auxiliar del sincrotrón de gradiente alternativo de 33 MeV existente en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (Brookhaven National Laboratory).

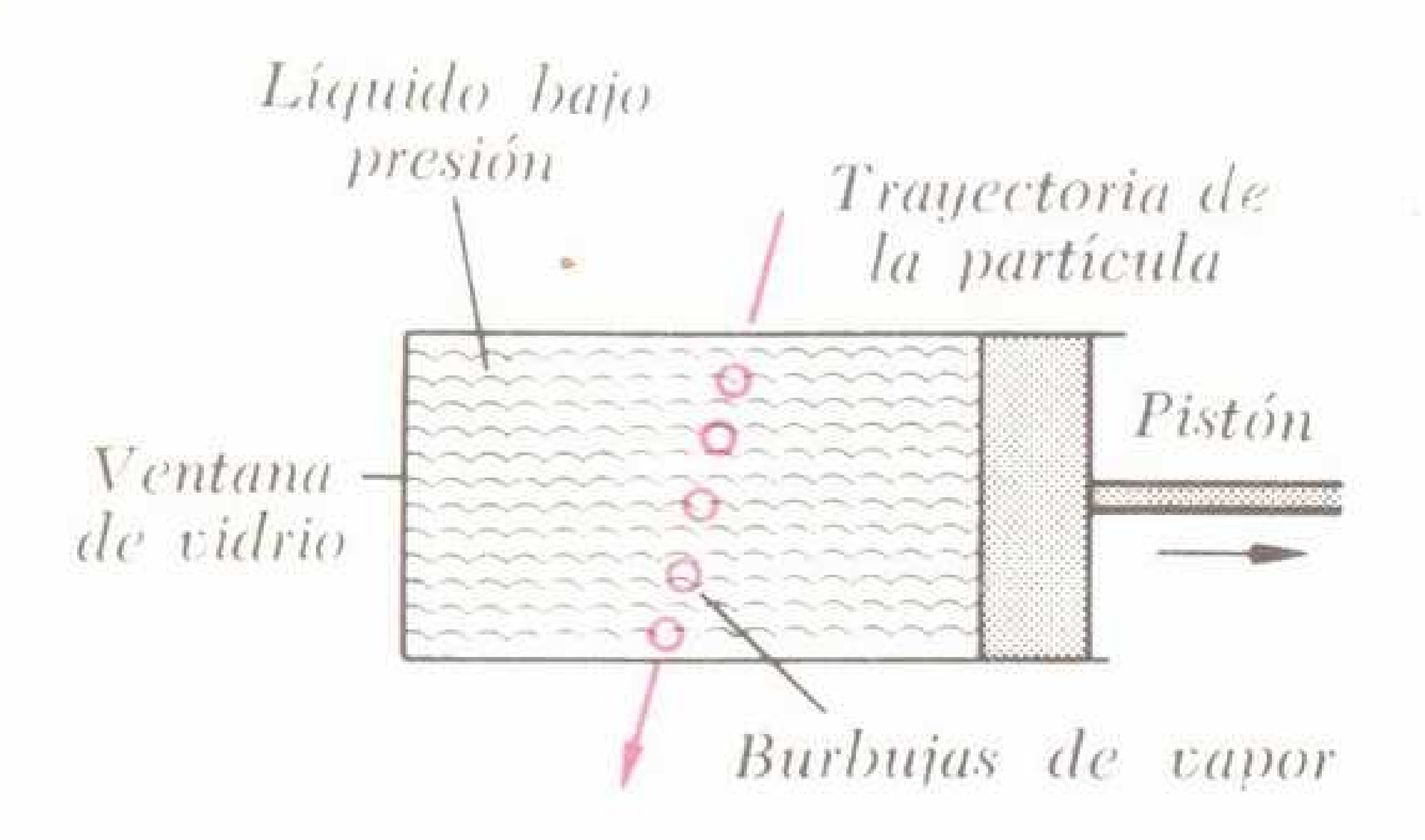


Fig. 3-27. Principio de la cámara de burbujas. El pistón se desplaza hacia la derecha para disminuir bruscamente la presión sobre el líquido calentado.

En la *cámara de chispa* recientemente desarrollada (Fukui y Miyamoto, 1959), las partículas cargadas que atraviesan la cámara dejan detrás de ellas una traza de iones, posibilitando así las trayectorias io-

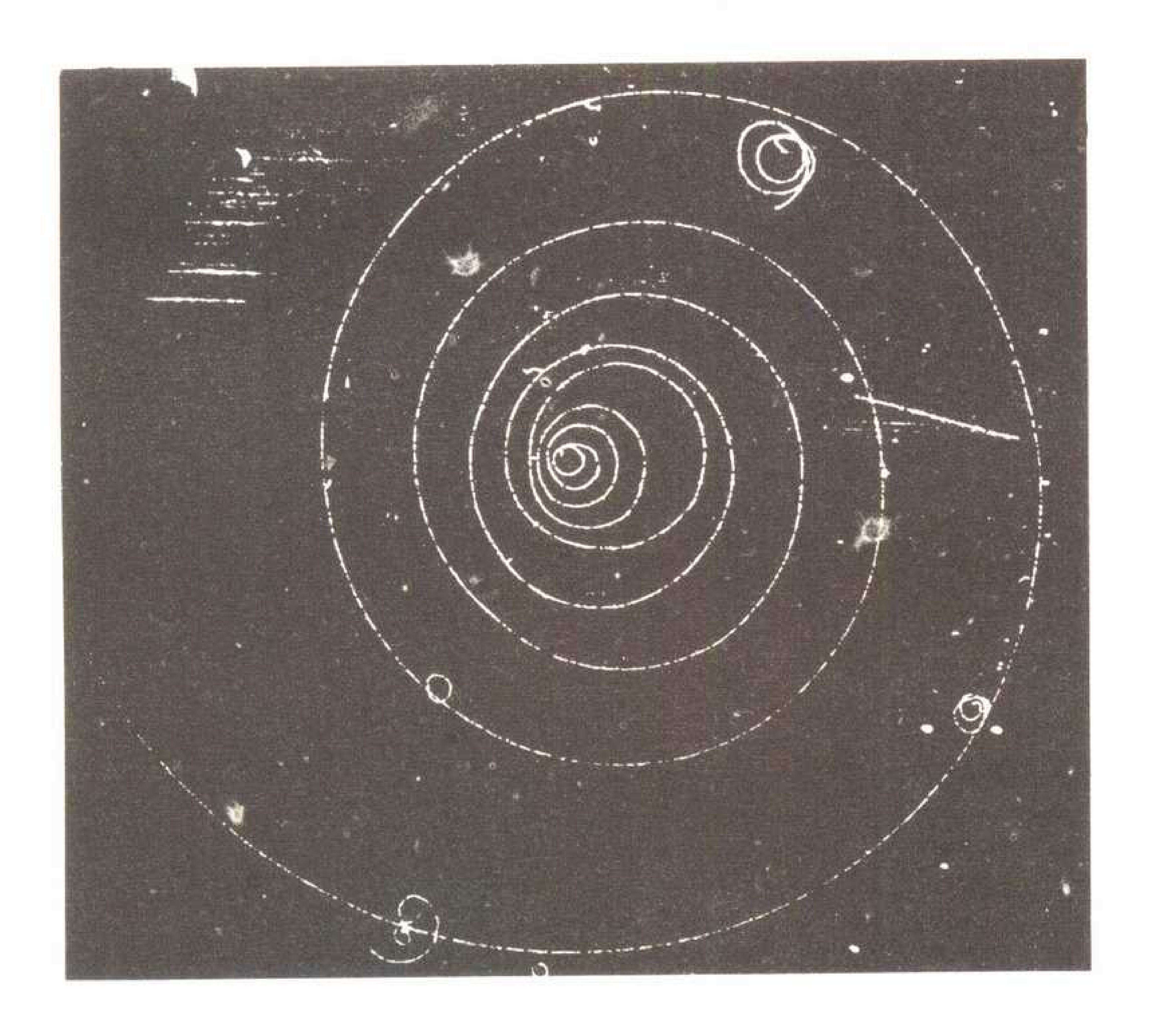
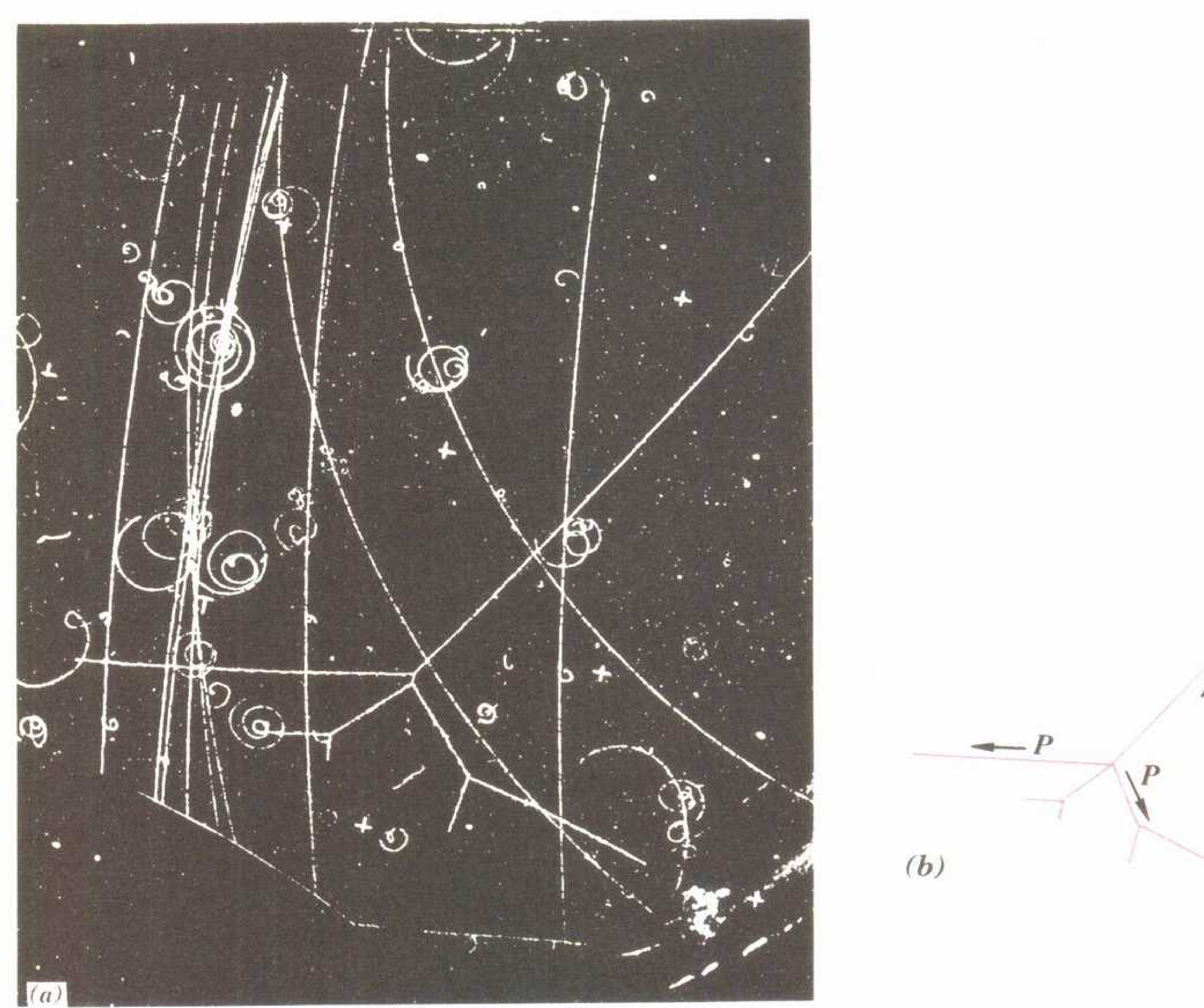


Fig. 3-28 A. Un electrón entra en la cámara de burbujas por la parte izquierda superior y gira en espiral hasta llegar al reposo a medida que pierde velocidad. La trayectoria en espiral se obtiene mediante un campo magnético aplicado a la cámara que desvía la partícula cargada haciéndola recorrer una trayectoria curva. La trayectoria recta que cruza a la espiral y que se observa a la derecha es de un protón que retrocede como consecuencia del choque con un neutrón errante. La trayectoria del protón cuya masa es relativamente mucho mayor tiene menos curvatura (casi recta). Extraído de "Introducción a la detección de partículas nucleares en una cámara de burbujas". Con permiso de **The Ealing Press.** Fotografía original registrada por **Lawrence Radiation Laboratory. Universidad de California.**

nizadas, que las chispas de alta tensión atraviesan las placas metálicas alternadas eléctricamente cargadas (fig. 3-29). La cámara está llena con neón y situada en semiconductores de *estado sólido* están comenzando a reemplazar a todos los demás en el campo de la investigación nuclear de baja energía. Se los fabrica con silicio



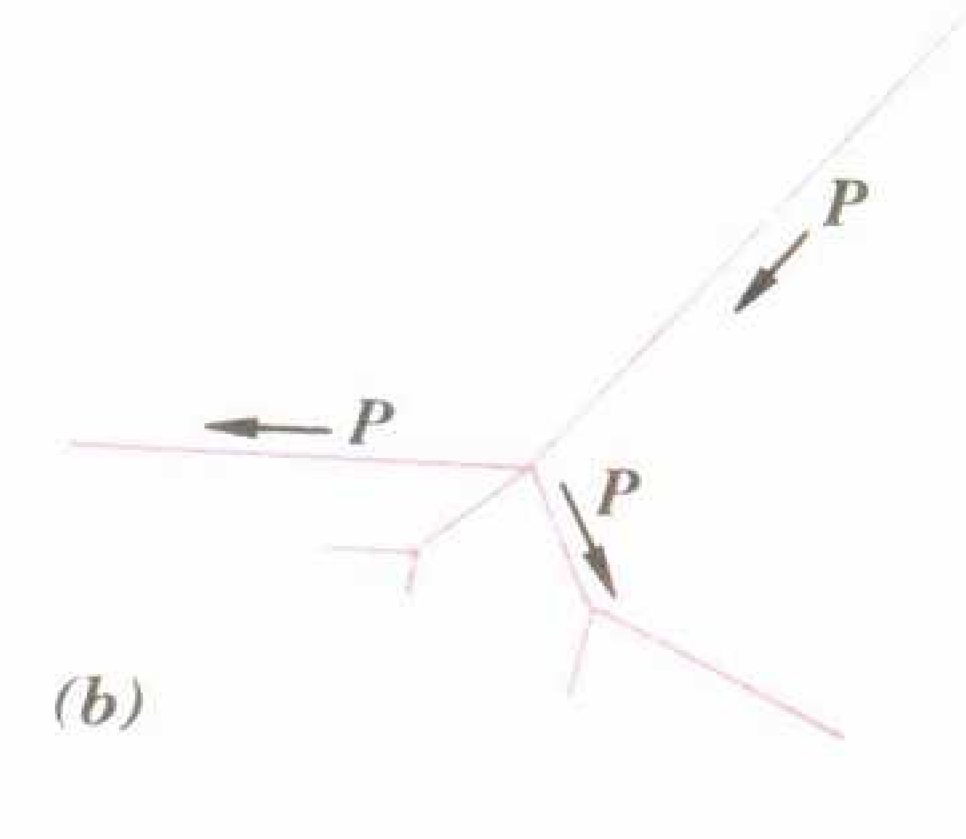


Fig. 3-28 B. Diseminación múltiple de protones en una cámara de burbujas llena con hidrógeno líquido. En consecuencia, todas las interacciones de las partículas que entran deben verificarse con núcleos de hidrógeno (protones) o con electrones orbitales de átomos de hidrógeno. Un protón ingresa en la cámara por la parte superior derecha y se desvía al chocar con otro protón; a ésto siguen otras nuevas diseminaciones. Obsérvese que en cada uno de estos choques el ángulo entre las trayectorias resultantes es de 90°, debido a que son choques de "bolas de billar" entre partículas de igual masa. Las trayectorias en espiral son producto de electrones de Compton de baja energía expulsados de los átomos de hidrógeno por los rayos gamma. También son visibles trayectorias de otras partículas. Extraído de "Introducción a la detección de partículas nucleares en una cámara de burbujas". Con permiso de **The Ealing Press.** Fotografía original registrada por **Lawrence Radiation Laboratory,** Universidad de California.

un fuerte campo magnético. La serie de chispas delinea la trayectoria de las partículas incidentes que, al igual que en el caso de la cámara de burbujas, se desplazan en las tres dimensiones.

Los nuevos contadores de radiación altamente purificado, pueden ser de un tamaño inferior al de una moneda de diez centavos, son capaces de analizar e identificar rayos y partículas ionizantes y además medir la energía de éstos. En cuanto a su aspecto los contadores se parecen

a los cristales de centelleo, pero desde el punto de vista del funcionamiento son más similares a las cámaras de ionización.

En una forma de comportamiento, el contador de estado sólido convierte directamente la radiación incidente en corriente eléctrica, esencialmente de la misma manera que una célula solar de silicio convierte la energía luminosa en electricidad. Otra técnica comprende la transferencia de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción, con el resultado de que en el cuerpo del cristal se forman lagunas positivas y electrones en exceso. Estos sirven como portadores de carga, generando así impulsos de corriente.

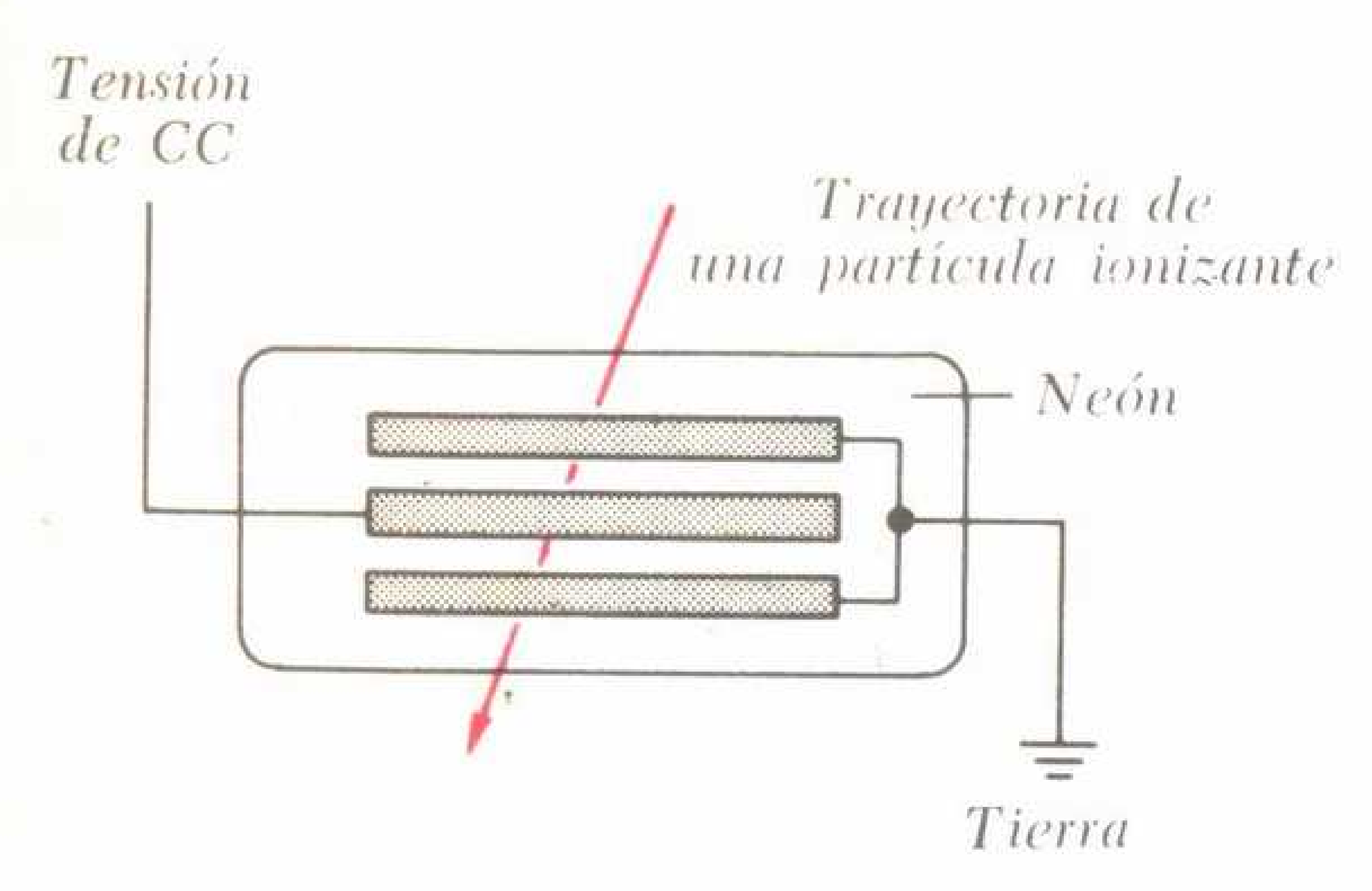


Fig. 3-29. Diagrama de una sencilla cámara de chispa.

9 ISOTOPOS RADIOACTIVOS

Los isótopos radioactivos se obtuvieron por primera vez irradiando diferentes objetivos en el reactor atómico de Oak Ridge, Tennessee (EE.UU. de Norteamérica). También se los puede extraer de ciertos productos de la reacción de fisión, u obtener mediante el bombardeo del objetivo en ciclotrones y otros aceleradores. Actualmente, se puede obtener una gran variedad de isótopos radioactivos de diferentes vida media y actividad específica. De los isótopos de vida media larga se tiene frecuentemente una provisión; en cambio los materiales de vida media corta se preparan a pedido. Para usos de laboratorio, los isótopos de baja actividad no presentan peligro especial para la salud y en los EE.UU. de Norteamérica no requieren licencia de la Comisión de Energía Atómica. Así una muestra de 10 μCi de Ca^{45}, que tiene una vida media de 163 días, es una fuente segura y conveniente de partículas beta de 0,254 MeV. También es altamente conveniente y segura una fuente de 50 μCi de C^{14} que posee una vida media de 5 568 años y emite partículas beta con una energía de 0,154 MeV. El cobalto 60 preparado mediante el bombardeo de Co^{59} con electrones

$$({}^{59}_{27}\text{Co} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co})$$

se puede obtener en el laboratorio con una potencia de 1 μCi y emite tanto rayos beta como gamma. Para usos médico e industrial (irradiación), la potencia del Co^{60} puede incrementarse hasta el valor de algunos *kilocuries,* para lo cual se precisa protección y manipuleo especial (fig. 3-30).

El uso de los isótopos radioactivos ha crecido enormemente. Por medio de la irradiación se logró que las frutillas resistieran al moho y se eliminó la triquinosis de los productos porcinos, la sopa enlatada se hizo más consistente y el "ketchup" (salsa de tomate) más fluido. En la actualidad las moléculas pequeñas pueden polimerizarse para obtener otras de tamaño mayor. A su vez, las ligaduras de estas últimas se debilitan por irradiación y se degradan en el proceso. Las mutaciones de las semillas, la esterilización de la capa superior del suelo y la conservación de los alimentos (por ejemplo, el tocino), son además otras aplicaciones de la técnica de la radiación.

En el campo de la medicina, el iodo (I^{131}) suministrado por vía interna se utiliza para diagnosticar estados tiroideos patológicos. El fósforo 32 se emplea en el tratamiento de las enfermedades malignas de la médula ósea. El cobalto 60 se utiliza en la terapia del cáncer pero sólo como fuente de radiación *externa.*

La actividad de los isótopos radioactivos puede investigarse por medio de los diversos contadores o detectores descriptos en la sección precedente. Estos "átomos rotulados", o trazadores, se utilizan en me-

talurgia para el estudio de la difusión de partículas a través de metales y en las investigaciones sobre corrosión y desgaste. En el motor de un automóvil pueden instalarse aros radioactivos en los pistones, extrayéndose periódicamente muestras de aceite lubricante que ha estado en contacto con aquéllos a fin de efectuar una medición de la radioactividad. El índice de la cuenta resultante sirve como medida de la eficacia del lubricante. La fig. 3-31 es un diagrama del uso de un trazador radioactivo para localizar una pérdida en un tubo conductor de aceite.

Contadores Geiger o de centelleo

Instrumento contador de velocidad

Fig. 3-31. Utilización de un trazador radioactivo para localizar una pérdida en un caño.

10 FISION NUCLEAR, LA PILA Y LA BOMBA

En 1934, Enrico Fermi que en ese entonces era profesor de la Universidad de Roma, comenzó a bombardear uranio con neutrones lentos, con el fin de convertir al elemento de número atómico 92 (uranio) en uno de número atómico 93 (neptunio). Fermi, juntamente con Hahn, Strassman y Maitner presumían que un bombardeo de este tipo generaría elementos radioactivos *transuránicos*. (En realidad, se produjeron algunos isótopos radioactivos de elementos de mayor número atómico). En 1939, Hahn informó que la actividad observada de la reacción se debía en gran parte a la descomposición del núcleo de uranio en núcleos de bario y criptón, o de algunos otros elementos situados en la parte central de la Tabla Periódica de los Elementos. Meitner, Frisch, Dunning, y otros al poco tiempo señalaron que la radioactividad observada era producida por estas partículas de *fisión* o *fragmentación* mas bien que por los elementos de número atómico superior a 92. Se indicó que el resultado de esta fisión era una liberación de 200 MeV de energía.

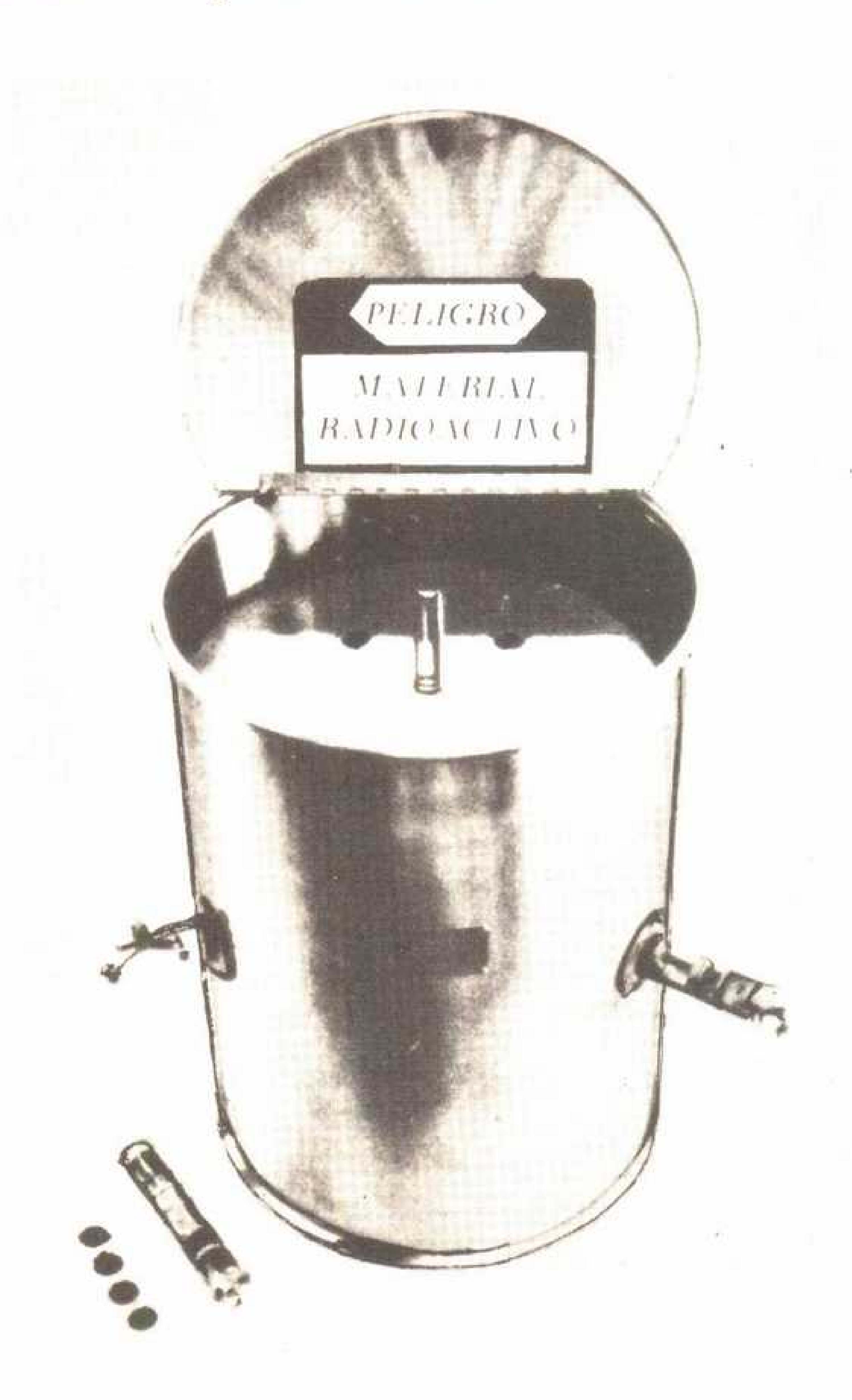
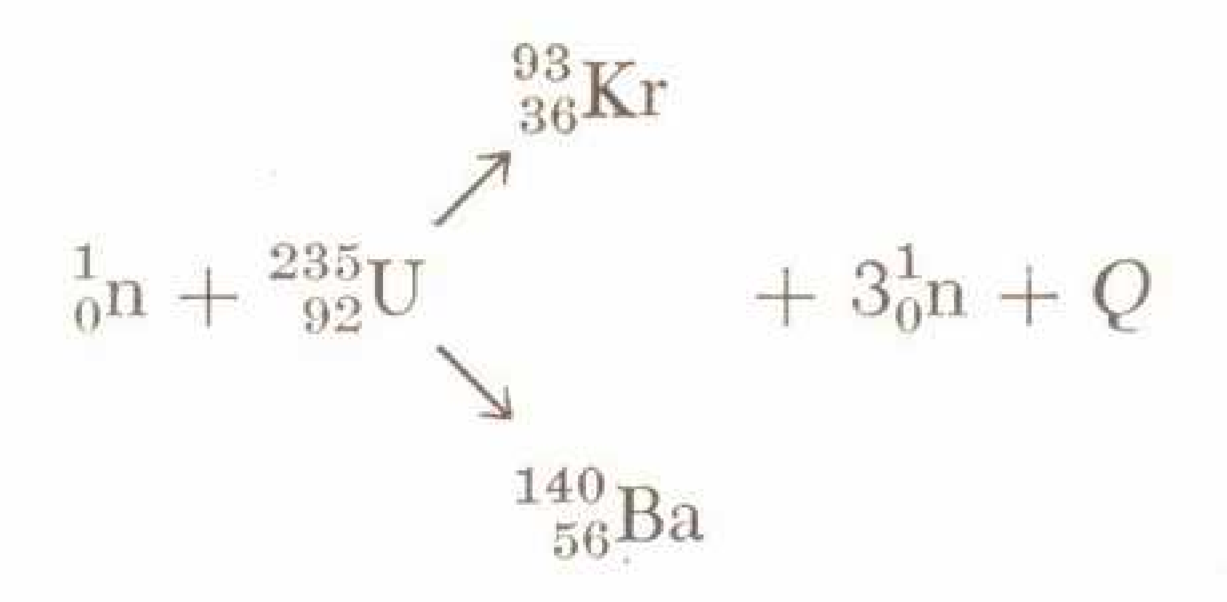


Fig. 3-30. Tanque de almacenamiento para material radioactivo.

Nuevas investigaciones establecieron que los neutrones con una energía inferior a 1 MeV sólo producían la fisión del $^{235}_{92}U$, isótopo que se encuentra en el uranio natural en proporción de sólo 0,71 %. (El $^{238}_{92}U$ más abundante, captura neutrones lentos sin que se produzca fisión). Lo más importante de todo, fue que se verificó que se podían obtener suficientes neutrones a partir de la fisión de un núcleo para producir las fisiones siguientes,

haciendo concebir la esperanza de posibilitar una reacción en cadena. Se había dado el primer paso para la producción de vastas cantidades de energía nuclear.

La fig. 3-32 explica el proceso mediante el cual se puede producir la fisión del uranio 235. La captura del neutrón que choca distorsiona el núcleo de uranio, en forma bastante similar al de una *gota inestable de líquido*. El núcleo "estirado" comienza a subdividirse en dos partes más livianas pero más estables, liberando en el proceso neutrones adicionales y energía térmica. La reacción puede representarse de la siguiente manera.



$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{93}_{36}Kr + {}^{140}_{56}Ba + 3{}^{1}_{0}n + Q $$

El primer reactor nuclear o "pila" atómica que entró en funcionamiento, fue montado en 1942 en los terrenos de la Universidad de Chicago, bajo la supervisión de Fermi, Zinn y Anderson. En la composición de la pila entraron aproximadamente seis toneladas de uranio y óxido

Fig. 3-32. Proceso de fisión del uranio. La captura del neutrón que choca "estira" el núcleo del uranio que finalmente se subdivide en dos partes más livianas. Se liberan tres neutrones "hijos".

de uranio. La carga fue esparcida en forma uniforme a través de una red cúbica, en la cual bloques de grafito servían como *moderadores* para reducir la velocidad de los neutrones que chocaban al oponerles núcleos de carbono de tamaño comparable. La pila se instaló debajo de una gran carpa fabricada con tela para globos aerostáticos en la que podía hacerse el vacío para eliminar el aire contaminado con neutrones. Esta pila en forma de cúpula era el primer reactor de uranio y grafito natural.

Para que el reactor funcionara por sí solo la cantidad de neutrones producida por fisión debía superar la cantidad primitiva lanzada contra el uranio. Evidentemente, el *factor de multiplicación* (k), definido como la relación existente entre el número de neutrones "hijos" y el número de neutrones "padres", debía ser superior a 1. (Previamente, una pila experimental de la Universidad de Columbia, consistente en un cubo de 0,226 m^3 que tenía aproximadamente 7 toneladas de uranio distribuidas a través del mismo, mostró un factor k de sólo 0,87.) El 2 de diciembre de 1942 la pila de Chicago funcionó por sí misma, siendo $k = 1{,}0006$. Su trabajo se controlaba mediante una disposición cuidadosa de varillas de cadmio o boro que absorbían neutrones y "apagaban" el "fuego" atómico cuando se las sumergía profundamente en el interior de la pila y cuando se las retiraba permitían que se llevara a cabo la reacción en cadena. Inicialmente funcionaba a un nivel de energía de sólo ½ W; posteriormente se elevó a 200 W la potencia de salida de la pila de Chicago.

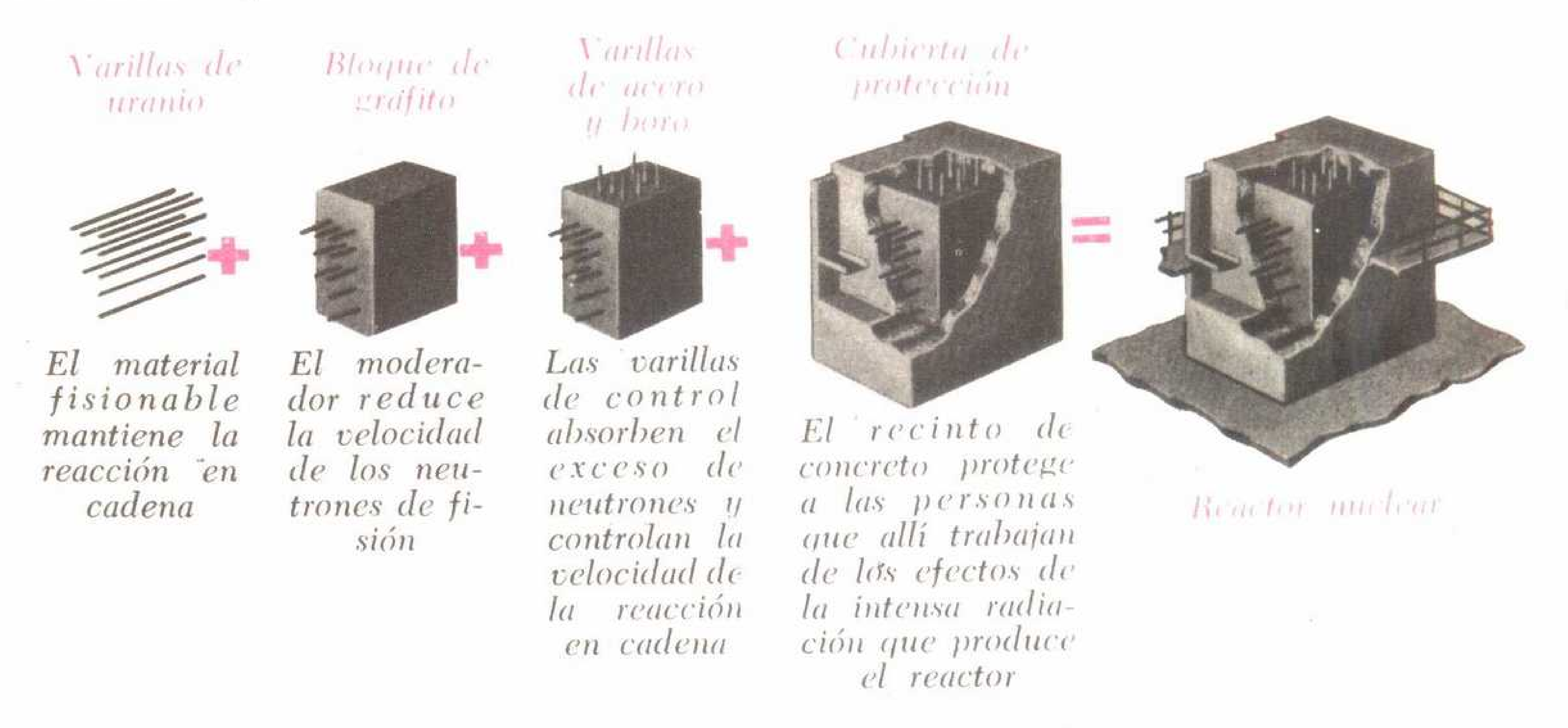


Fig. 3-33. Construcción de un reactor nuclear.

En la fig. 3-33 se ilustran los principios básicos sobre los cuales se basa la construcción del primer reactor nuclear y modelos posteriores. En la misma se ilustra la disposición del material fisionable, el moderador, las varillas de control y el alojamiento de concreto utilizado como cubierta de protección.

La Seguna Guerra Mundial creó la necesidad de la bomba atómica, suponiéndose entonces que Alemania la estaba desarrollando. En Oak Ridge, Tennessee (Clinton Engineering Work) se instaló una planta de separación de isótopos en la cual a un costo tremendo se separó una cantidad adecuada de U^{235} fácilmente fisionable del mucho más abundante U^{238}. En 1943 estaba en funcionamiento el reactor de Hanford enfriado con agua (Columbia River, Washington). Es del tipo uranio-grafito sólido o *heterogéneo* y fue diseñado para producir aun otro elemento fisionable, el *plutonio*, ${}^{239}_{94}Pu$. La producción de plutonio, que se origina

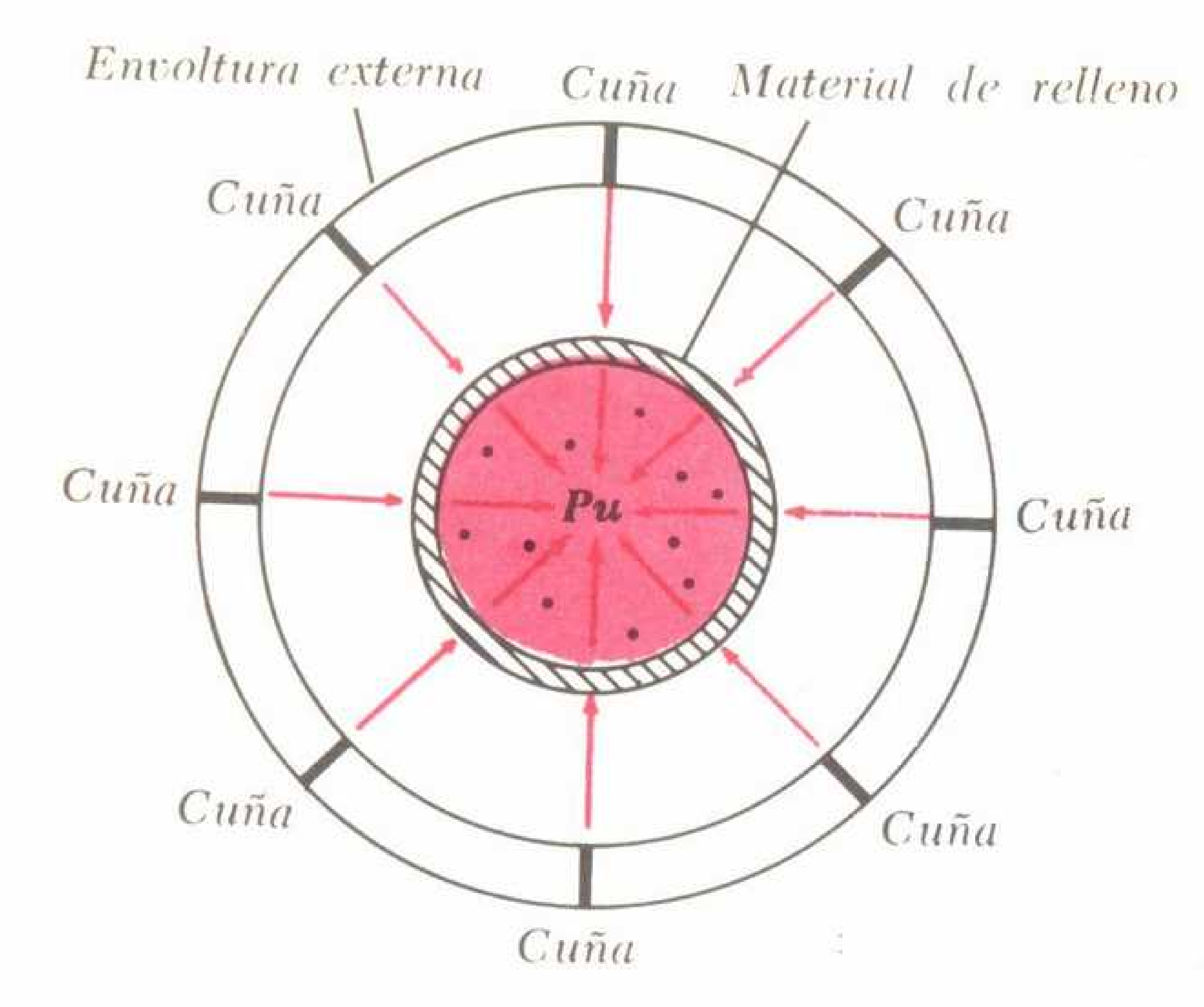


Fig. 3-34. Corte imaginario a través de una bomba atómica. Una explosión convencional (en realidad una **implosión**) impulsa a las cuñas, C, hacia la envoltura externa, comprimiendo una masa dispersa subcrítica de plutonio convirtiéndola en una masa crítica compacta con **mayor masa por unidad de volumen.** La explosión atómica resultante queda retenida durante una fracción de segundo por un **material de relleno** reflector especial, que también hace retroceder a muchos neutrones hacia el interior de la bomba.

como resultado del bombardeo con neutrones del ${}^{238}_{92}U$, enriquecimiento con ${}^{235}_{92}U$, obedece las siguientes reacciones:

$${}^{1}_{0}n + {}^{238}_{92}U$$

$$\rightarrow {}^{239}_{92}U \text{ (isótopo de uranio)}$$

$${}^{239}_{92}U - {}^{0}_{-1}e$$

$$\rightarrow {}^{239}_{93}Np \text{ (neptunio)}$$

$${}^{239}_{93}Np - {}^{0}_{-1}e$$

$$\rightarrow {}^{239}_{94}Pu \text{ (plutonio)}$$

De esa manera, se produjeron artificialmente dos elementos totalmente nuevos de los cuales el último es fácilmente fisionable. Debido a que el plutonio es *químicamente* único, se separa mediante métodos químicos de los otros ingredientes que quedan en la pila. La lista de los materiales actualmente fisionables incluye: U^{235}, Pu^{239} y U^{233}.

La primera bomba atómica o de fisión nuclear se hizo estallar en 1945 en Alamogordo, Nueva Méjico. Los detalles de la construcción de la bomba y el mecanismo de disparo son un secreto celosamente guardado. Sin embargo, se sabe que la reacción en cadena, en este caso producida mediante neutrones *rápidos* mas bien que lentos o térmicos y en consecuencia no controlable y de carácter violento, puede llevarse a cabo sólo si se utiliza U^{235} o Pu^{239} puros y si el tamaño de la masa fisionable supera el denominado tamaño *crítico.* El *Informe Smyth* (*Smyth Report*) oficial sugiere que la explosión fue producida poniendo en contacto rápido e íntimo, dos o más masas fisionables *subcríticas* (fig. 3-34).

La denominada bomba "nominal" que se lanzó sobre Hiroshima en 1945 (se lanzó otra sobre Nagasaki y casi inmediatamente terminó la Segunda Guerra Mundial en el Pacífico) se dijo que tenía un efecto equivalente a 20.000 toneladas de TNT. Se cree que la temperatura provocada por una explosión atómica es de aproximadamente 10.000.000°C, casi la existente en el interior del sol. Los productos radioactivos de la fisión se esparcen en todas direcciones, liberando neutrones, rayos gamma y electrones. Además, existe una tremenda cantidad de radiación térmica (infrarroja) y una sacudida debida a la producción de gases a alta presión.

11 REACTORES DE INVESTIGACION E INDUSTRIALES

El reactor nuclear es una herramienta de investigación, de la que se obtienen nuevos elementos químicos, diversos productos de fisión, isótopos emisores de rayos alfa, beta y gamma y neutrones secundarios. También es fuente de calor, que puede ser extraido de su núcleo mediante un líquido refrigerante apropiado, y utilizarse para producir vapor para accionar turbinas. Se espera que para 1980 en las plantas de energía nuclear se genc-

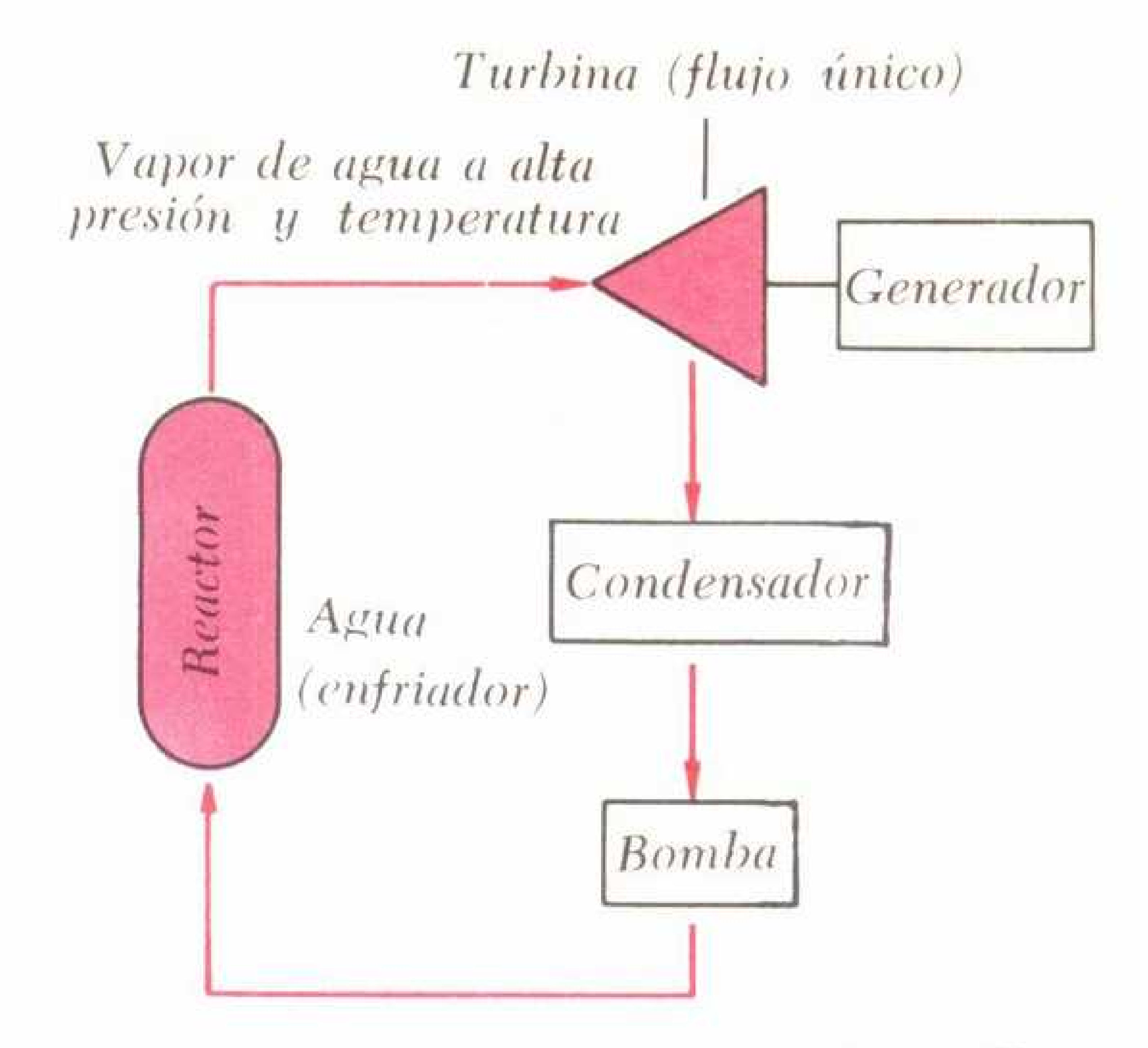


Fig. 3-35. Reactor de agua en ebullición (ilustrado en combinación con un intercambiador de calor).

ren aproximadamente 20.000.000 kW, que se sumarán a la capacidad de las plantas puramente térmicas e hidroeléctricas ya existentes. Para esa fecha, el costo de la energía nuclear podrá competir con el de la obtenida a partir de los combustibles convencionales.

El reactor de *agua en ebullición* entrega su calor al agua en un intercambiador de calor, pasando el vapor de agua resultante directamente a una turbina (fig. 3-35). Es el tipo de reactor empleado en la Estación de Energía Nuclear de Dresden (Morris, Ill.) de 200.000 kW, en la Planta de Energía de Bahía Humboldt (Bahía Humboldt, California) de 50.000 kW, en el Reactor La Crosse (Genoa, Wisconsin) de 50.000 kW y en la Planta Atómica de Bahía Bodega (Bahía Bodega, California) de 313.000 kW.

En el reactor en que se utiliza agua a presión (fig. 3-36) existen uno o varios intercambiadores de calor (intermedios) adicionales. El agua sobrecalentada en el "circuito" primario permanece en estado líquido, en tanto que entrega su calor al agua en el sistema secundario. Esta última es la que se convierte en vapor de agua productor de energía y cuya posible radioactividad se reduce notablemente en el proceso. Los reactores con agua a presión impulsan una serie de submarinos nucleares de la Marina de los EE.UU. de Norteamérica (fig. 3-37), la Estación de Energía Atómica de Shippingport (Shippingport, Filadelfia) de 60.000 kW, la Estación Eléctrica Atómica Yanky (Rowe, Mass.) de 175.000 kW y la Plata de Energía Atómica de Indian Point (Indian Point, N.Y.).

La fig. 3-38 es un diagrama de un

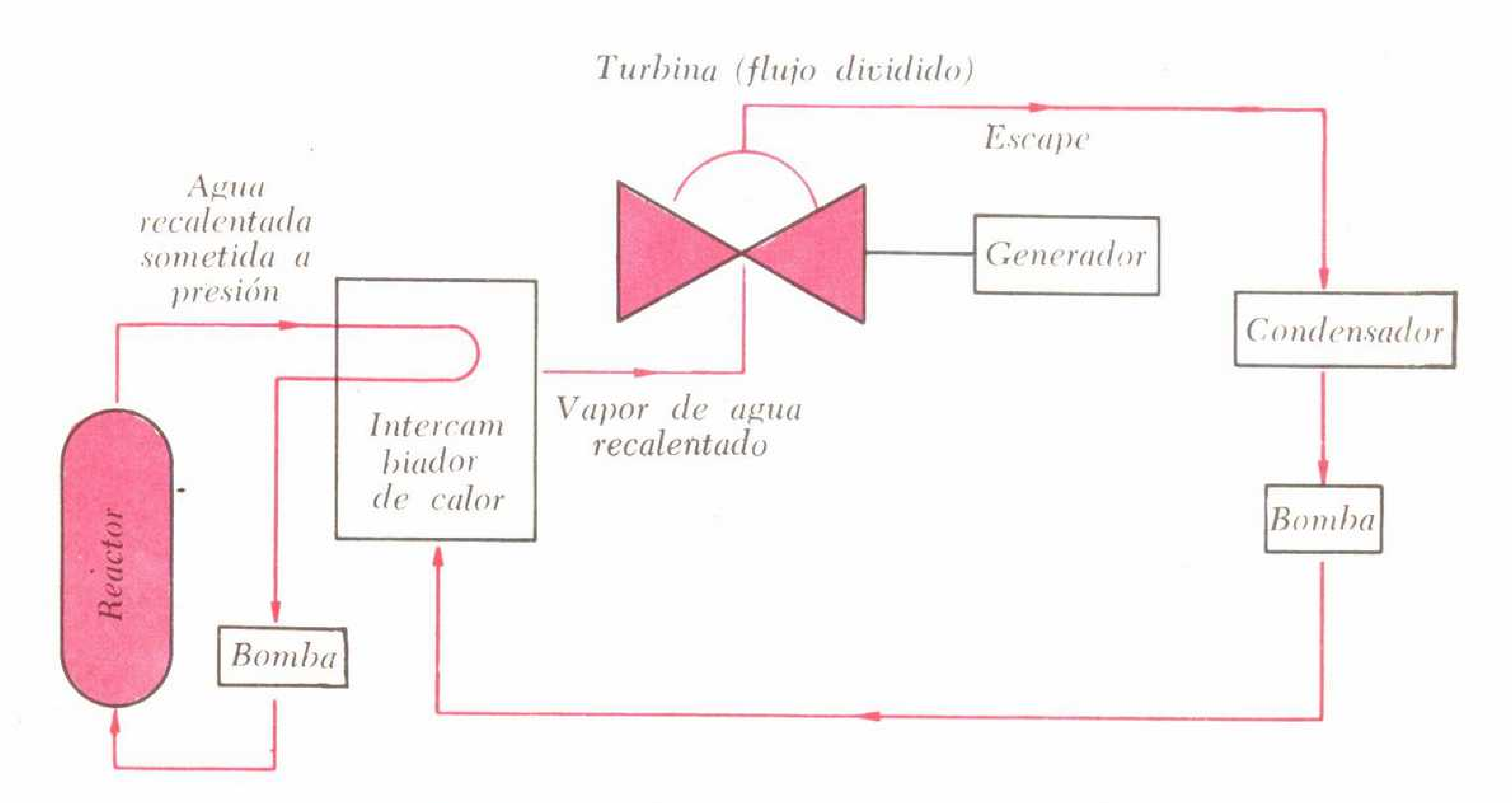


Fig. 3-36. Diagrama de un reactor de agua a presión.

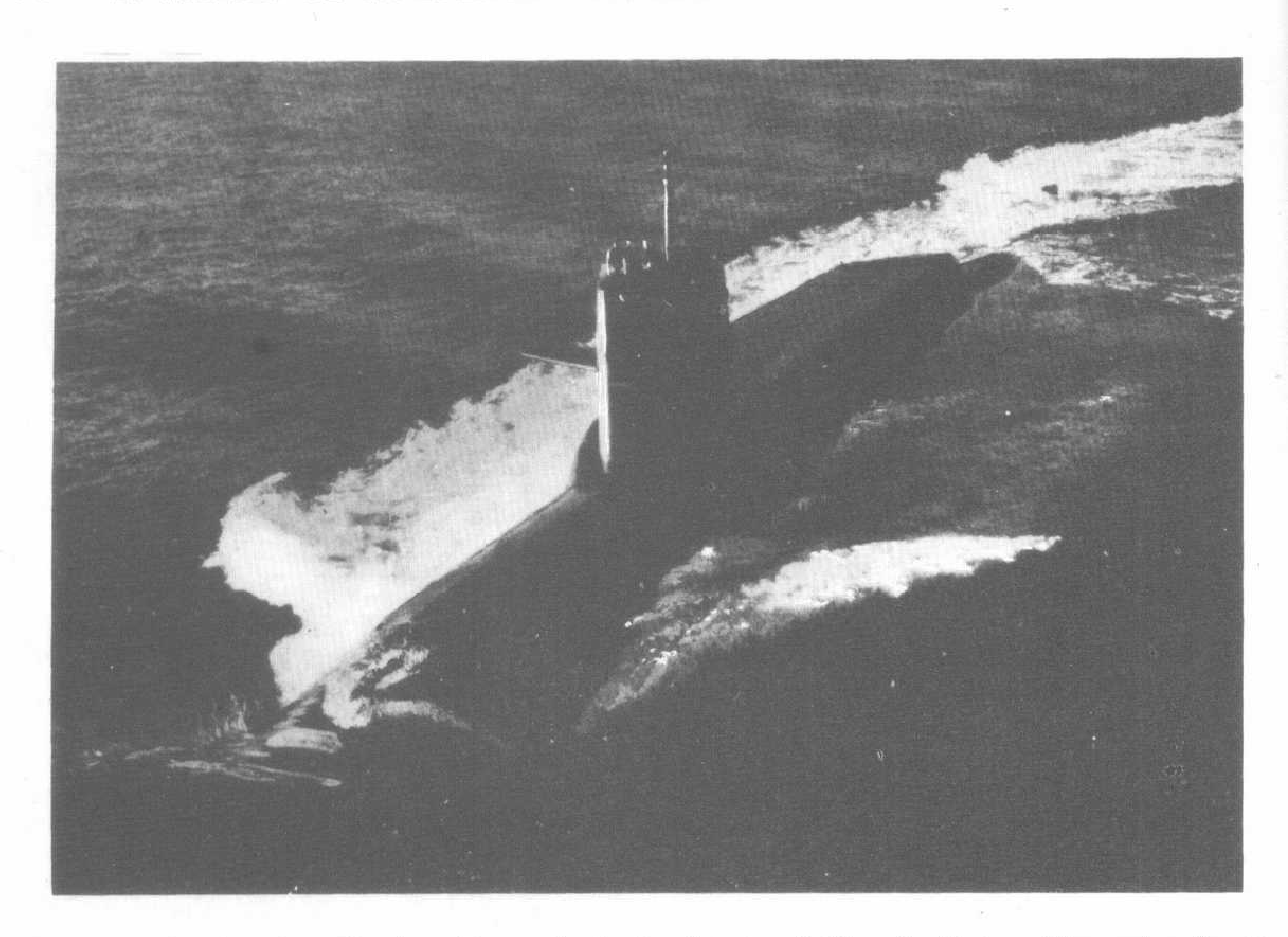


Fig. 3-37. El submarino **Theodore Roosevelt** de los Estados Unidos de Norteamérica entrando en San Diego el 22 de febrero de 1961.

reactor de grafito y sodio. El metal líquido conduce el calor desarrollado por el reactor moderado con grafito y lo lleva, en el primer intercambiador de calor, a otro circuito lleno de metal. El segundo intercambiador (generador de vapor de agua) transfiere el calor al agua y proporciona vapor de agua para impulsar una turbina. La instalación de Energía Nuclear de Hallam (Hallam, Nebraska) de 75.000 kW, utiliza este principio.

La Planta de Energía Atómica Enrico Fermi (Lagoona Beach, Michigan) de 100.000 kW es el reactor de *generación rápida* más grande del mundo y que actualmente produce 20% más de combustible del que consume. Utiliza uranio enriquecido (hasta 30 % de U^{235}, y el resto U^{238}). Los neutrones de desplazamiento rápido emitidos en la fisión del U^{235} penetran en el núcleo del U^{238} (por sí mismo no fisionable) fértil, produciendo plutonio fisionable que se suma a la energía de salida del reactor. Otro elemento fértil, el torio, puede ser transmutado en U^{233} fisionable, convirtiéndoselo de esta manera para que cumpla la función de generación.

La fig. 3-39 ilustra el ciclo de generación en que interviene uranio. Obsérvese la desintegración beta (emisión de partículas $_{-1}e$) en cada uno de los dos puntos del segundo proceso.

Consideremos ahora algunos de los importantes detalles de una típica instalación nuclear, tal como el reactor de 275.000 kW (275 MW) que funciona en Indian Point, Nueva York, del cual se puede observar una fotografía en la fig. 3-40. El combustible utilizado en el mismo está compuesto principalmente por torio 232 fértil, mezclado con una cantidad relativamente menor de U^{235} directamente fisionable. Cada carga de combustible (fig.

3-41), está compuesta por 17.250 kg de óxido de torio y 1.316 kg de óxido de uranio y está calculada para durar 600 días si se lo hace funcionar en forma continua a toda potencia.

Entre los tubos que contienen la carga circular agua desmineralizada a una presión de 105 kg/cm² y absorbe el calor producido por el núcleo. El agua calentada sometida a presión se bombea a través de la sección evaporadora de una caldera transformándose en vapor de agua. Luego, se seca el vapor de agua, pasa al recalentador en el cual su temperatura se eleva hasta 537,7°C. Esto aumenta considerablemente la cantidad de trabajo que puede realizar el vapor de agua en la turbina y eleva la eficacia de la planta. En la fig. 3-42 se ilustra una vista en corte de la planta completa.

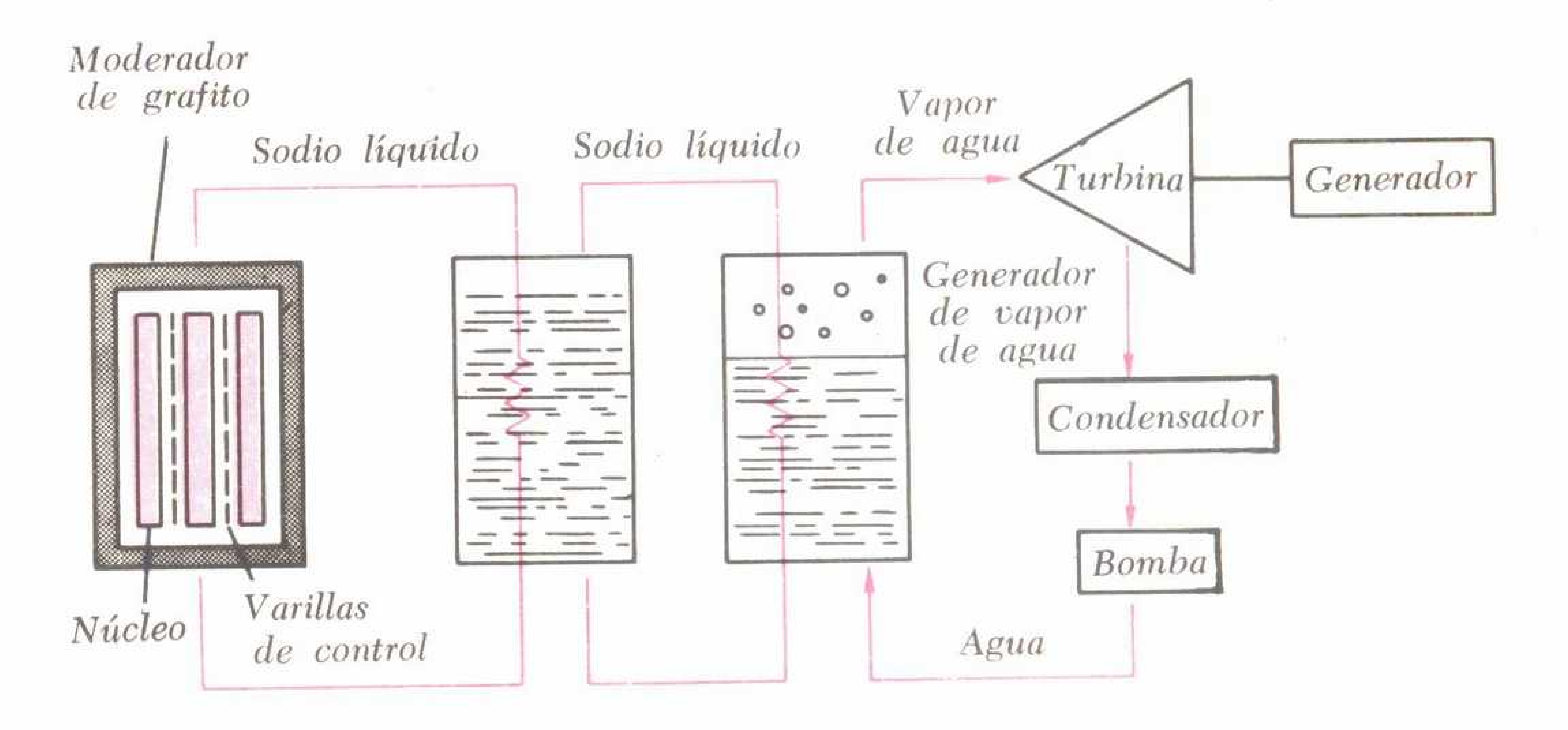


Fig. 3-38. Reactor enfriado con sodio líquido y moderado con grafito que posee dos intercambiadores de calor.

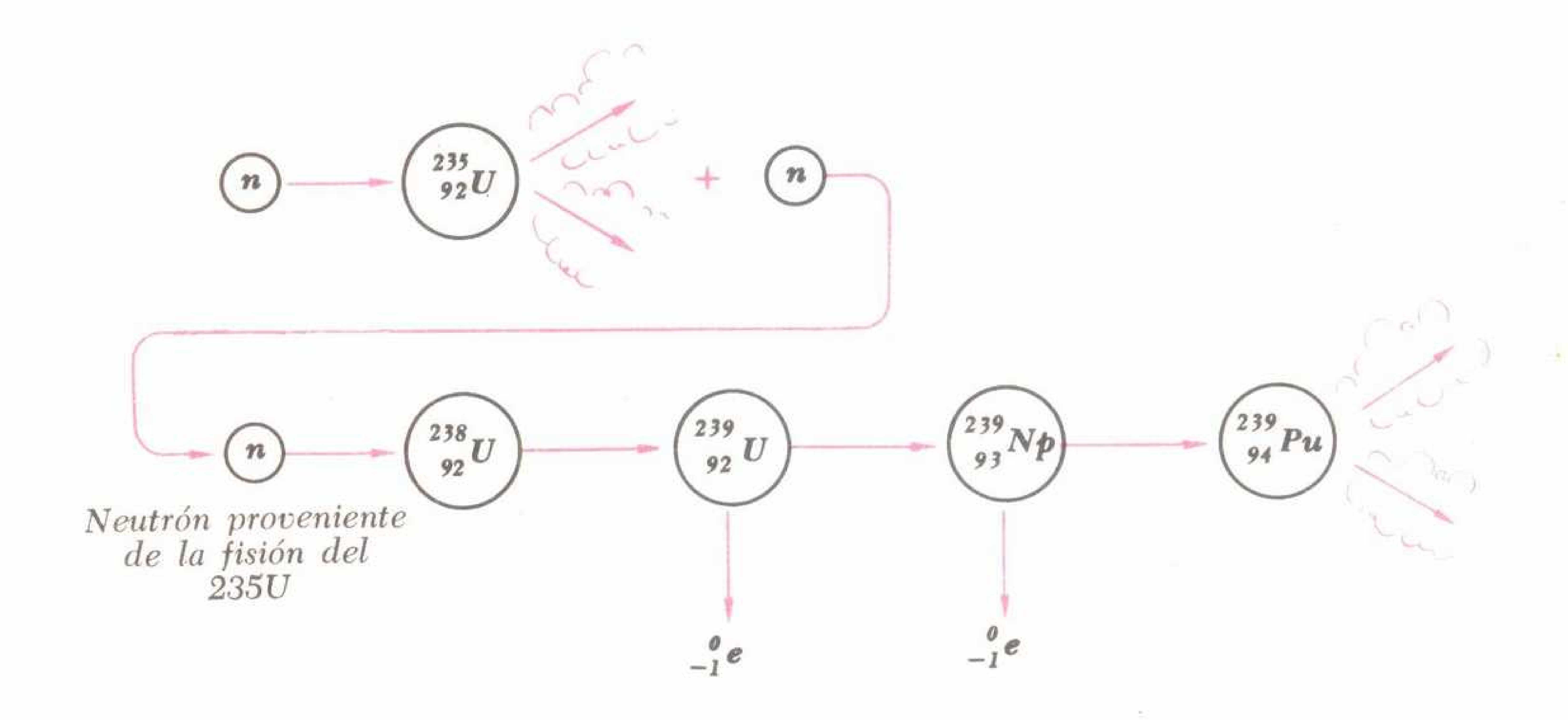


Fig. 3-39. Principio del ciclo generador aplicado a la fisión del U^{235}, y a la producción de combustible extra (Pu^{239}) a partir del U^{238}. La vida media del U^{239} es de 23 minutos y la del Np^{239} es de 2,8 días.



Fig. 3-40. Planta de energía nuclear de Indian Point.

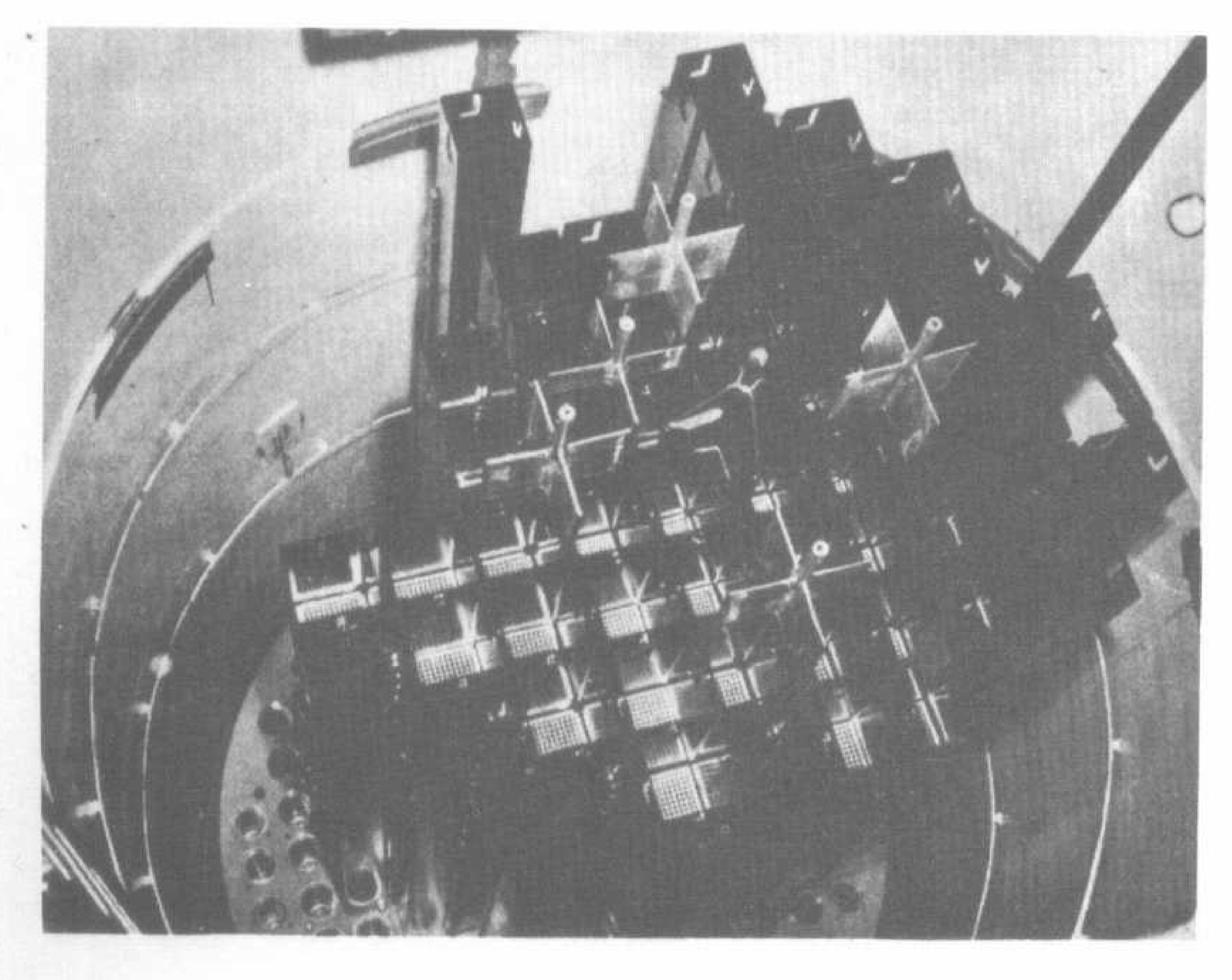


Fig. 3-41. Montaje del núcleo para el reactor nuclear.

12 ENERGIA NUCLEAR EN EL ESPACIO

Debido al interés por los viajes espaciales, ha aumentado la demanda de pe-

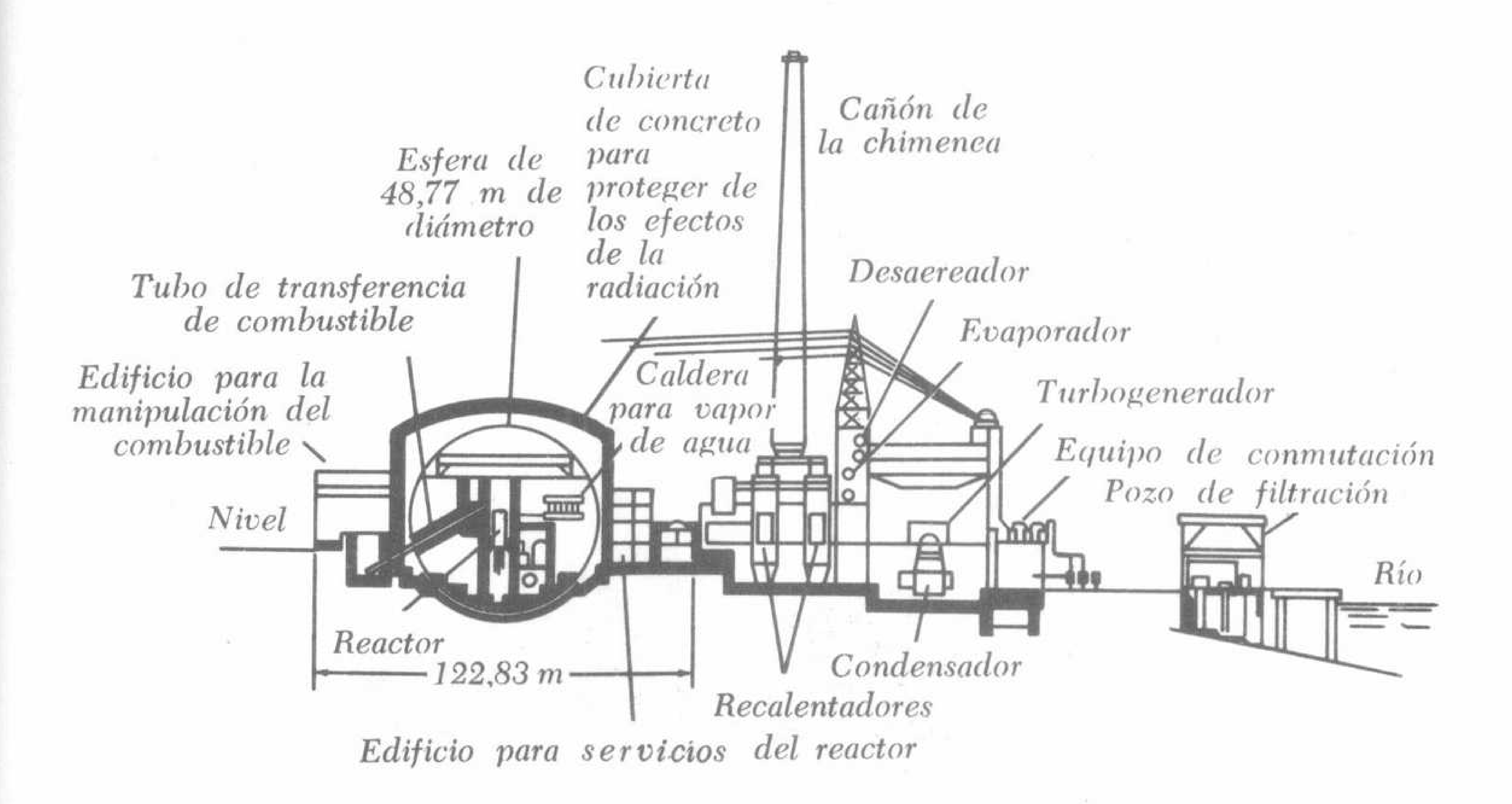


Fig. 3-42. Vista en corte de la planta de energía atómica de Indian Point.

queños reactores nucleares compactos como fuentes de energía para vehículos espaciales. En el denominado sistema de energía "Snap 2", ilustrado en despiece en la fig. 3-43, se obtiene un rendimiento eléctrico de 3.000 W de un reactor de 113,5 kg enfriado con una aleación líquida de potasio y sodio, acoplado a un pequeño turboalternador de vapor de mercurio. La potencia equivalente requeriría la utilización de aproximadamente 227.000 kg de baterías (para el trabajo de un año), o 139,35 m^2 de pilas solares.

El reactor obtiene su energía de la fisión del U^{235}. Un material compuesto por hidruro de uranio-circonio sirve como moderador del combustible y una cubierta de berilio actúa como reflector de neutrones. El líquido enfriador Na-K transfiere el calor del reactor a una caldera de mercurio que produce vapor de mercurio para impulsar una pequeña turbina.

En la fig. 3-44 se ilustra un diagrama del sistema del reactor "Snap 50/Spur" enfriado por litio líquido.

13 REACCIONES TERMONUCLEARES: LA BOMBA DE HIDROGENO

Se pueden liberar grandes cantidades de energía uniendo o fusionando conjuntamente ciertos núcleos *livianos*. La baja energía específica de ligadura (MeV por nucleón) de estos elementos, sugiere que si se lleva a cabo la fusión, se hallará que la masa del núcleo compuesto es menor que la suma de las masas individuales de las partículas livianas primitivas y el defecto de masa resultante se convertirá en energía. Así, la reacción de fusión:

$$ {}_1^1H + {}_0^1n \rightarrow {}_1^2H + Q $$

que comprende la interacción de un protón y un neutrón para formar un deuterón más energía de rayos gamma, da lugar a

la desaparición de 0,002391 unidades de masa atómica y la consiguiente liberación de 0,002391 × 931, o sea 2,23 MeV de energía.

Debido a que las partículas que se ponen en contacto habitualmente transportan cargas del mismo signo y en consecuencia se repelen entre sí, se debe generar suficiente energía cinética (mediante el establecimiento de altas *presiones* y *temperaturas*) para hacer posibles las reacciones

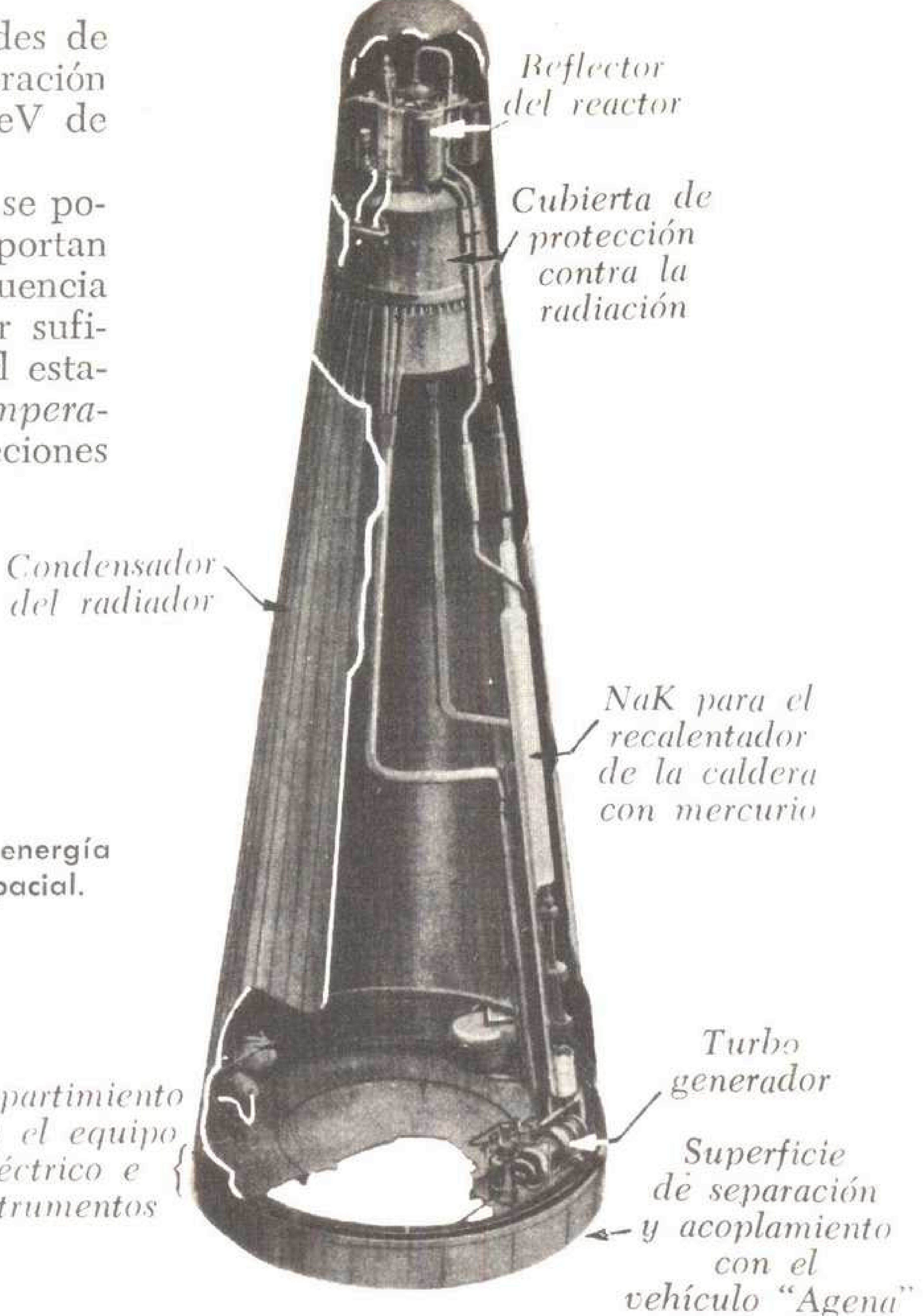


Fig. 3-43. Fuente de suministro de energía nuclear Snap-2 para vehículo espacial.

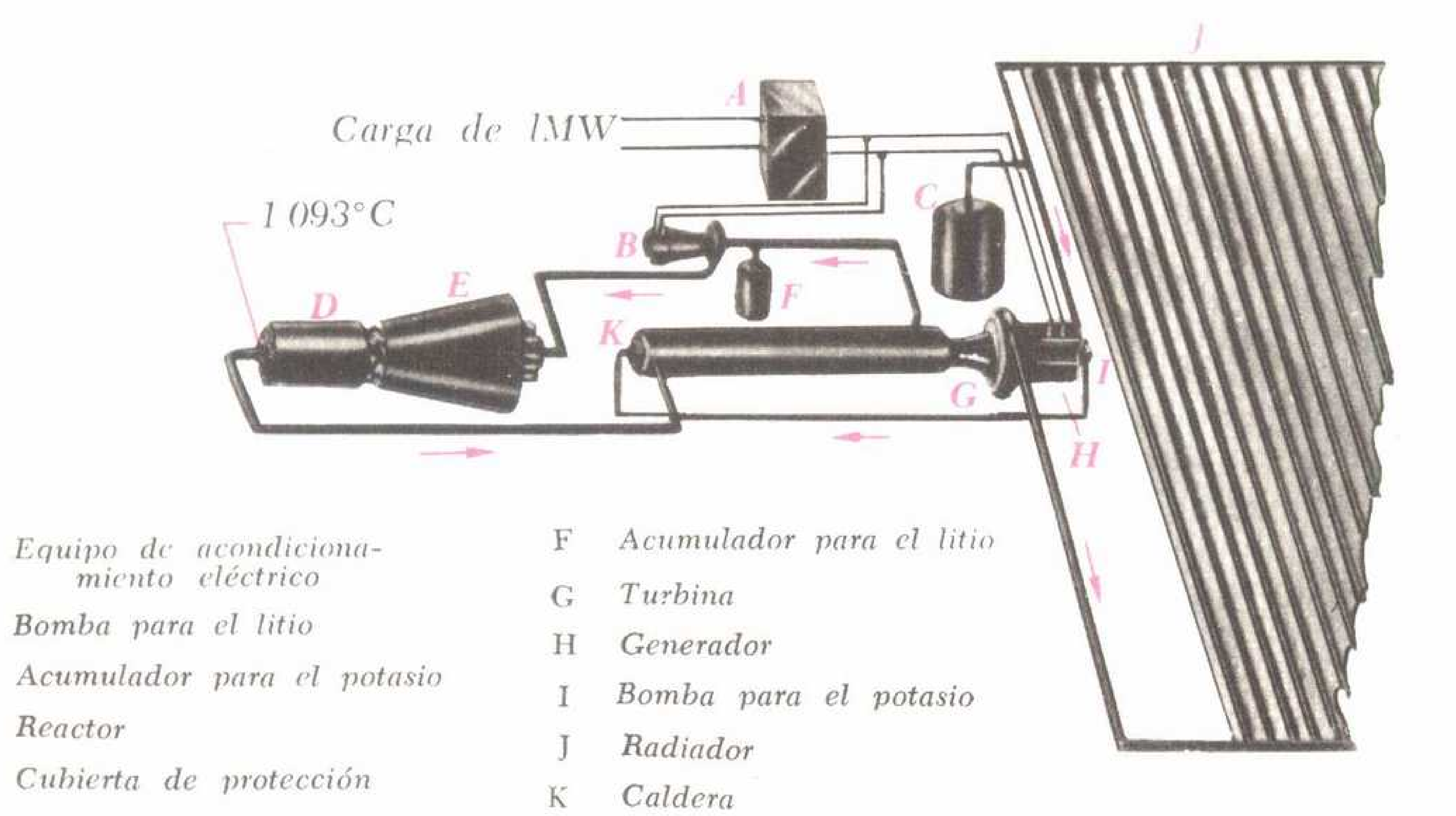


Fig. 3-44. Diagrama del sistema reactor Snap-50/SPUR enfriado con litio líquido, proyectado para proveer energía a grandes vehículos espaciales.

termonucleares. Esto se realiza fusionando protones y deuterones (^1_1H y ^2_1H), protones y protones (^1_1H y ^1_1H), deuterones y deuterones (^2_1H y ^2_1H), etc. La reacción que comprende la fusión de deuterones y tritones (^2_1H y ^3_1H), es decir,

$$^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^4_2He + ^1_0n + 17{,}6\ \text{MeV de energía}$$

produce una cantidad particularmente grande de energía, disipándola en el increíble corto lapso de 0,0000012 seg liberando en consecuencia un nivel muy alto de *energía*. Esta es la base de la moderna bomba de hidrógeno.

No es posible obtener una información detallada oficial respecto a la bomba de hidrógeno o a su forma exacta de trabajar. Se puede suponer que deuterones y tritones se fusionan conjuntamente bajo condiciones tremendas de presión y temperatura, tales como las que se pueden establecer mediante una bomba "A" que sirve como disparador o detonador (fig. 3-45). Otra suposición es que los núcleos componentes del hidruro de litio, ^7_3Li y ^1_1H se fusionen conjuntamente bajo la acción de una bomba de fisión de acuerdo con la reacción:

$$^7_3Li + ^1_1H \rightarrow 2\,^4_2He + Q\ (17{,}3\ \text{MeV})$$

La potencia explosiva de las bombas de hidrógeno es corrientemente medida en *megatones* (millones de toneladas) de TNT. A diferencia de la bomba "A", que tiene un tamaño práctico limitado, la bomba "H" es virtualmente un arma de "extremo abierto", limitada en cuanto a su tamaño sólo por la cantidad de U^{235} o plutonio que se puede utilizar en el disparador de la bomba y por ciertas otras necesidades estratégicas. Ya se han ensayado bombas de una potencia de 15 megatones.

Es interesante hacer notar que las estrellas (y el sol) tienen temperaturas internas de varios millones de grados y presiones del orden de millones de toneladas de kilogramos por centímetro cuadrado. Bajo esas circunstancias, las reacciones termonucleares en estos cuerpos se producen sin la acción de un equipo disparador adicional. Se estima que si la fuente de suministro de energía del sol fuera sólo producto de la combustión del carbono, se con-

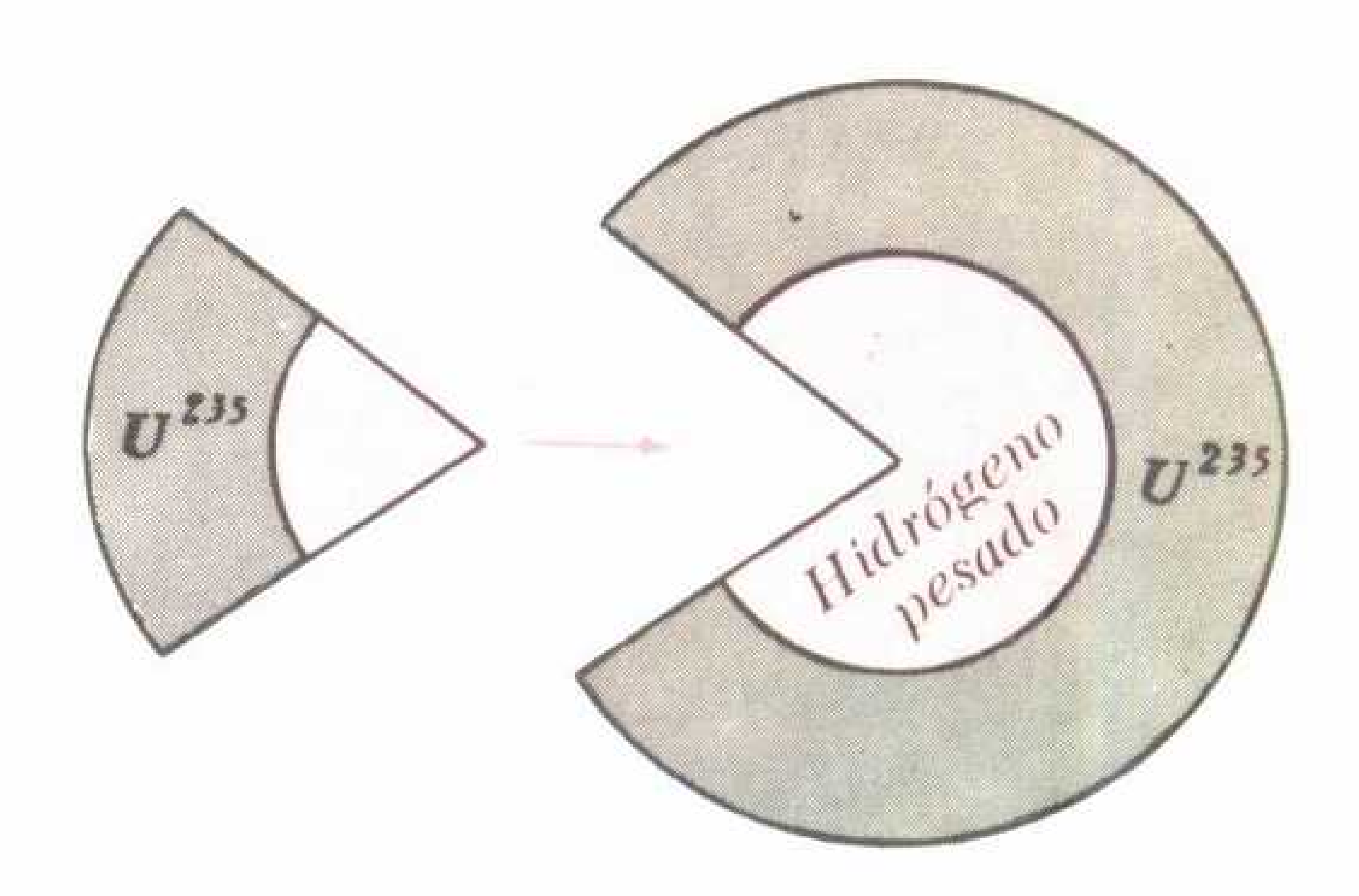


Fig. 3-45. Construcción imaginaria de una bomba de hidrógeno.

sumiría por completo en mil años. En cambio, bajo las condiciones actuales de presión interna enorme y temperatura de 10.000.000°C, se puede suponer que cada cuatro protones existentes en el sol se sintetizan formando una partícula alfa, liberando además dos positrones y una inmensa cantidad de energía radiante:

$$^1_1H + ^1_1H + ^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^4_2He + 2\,^{+0}_{1}e + Q$$

Durante el proceso la cantidad de carbono existente en el sol se mantiene invariable.

14 FISICA DEL PLASMA Y REACTORES DE FUSION

Desde hace aproximadamente cien años se está prestando atención al tema de la descarga eléctrica a través de un recipiente sometido parcialmente al vacío que contiene vestigios de un gas. Los experimentos fueron realizados por Hittorf, Crookes, Thomson, Rutherford y Townsend los cuales fueron complementados en 1939, por las investigaciones teóricas de Langmuir y Tonks, que definieron al *plas-*

ma gaseoso conductor como una mezcla incandescente de electrones, iones positivamente cargados y átomos neutros y moléculas. El interés actual en los reactores de *fusión controlada,* basados en la posibilidad de utilizar la fuente prácticamente inagotable de deuterones existentes en el

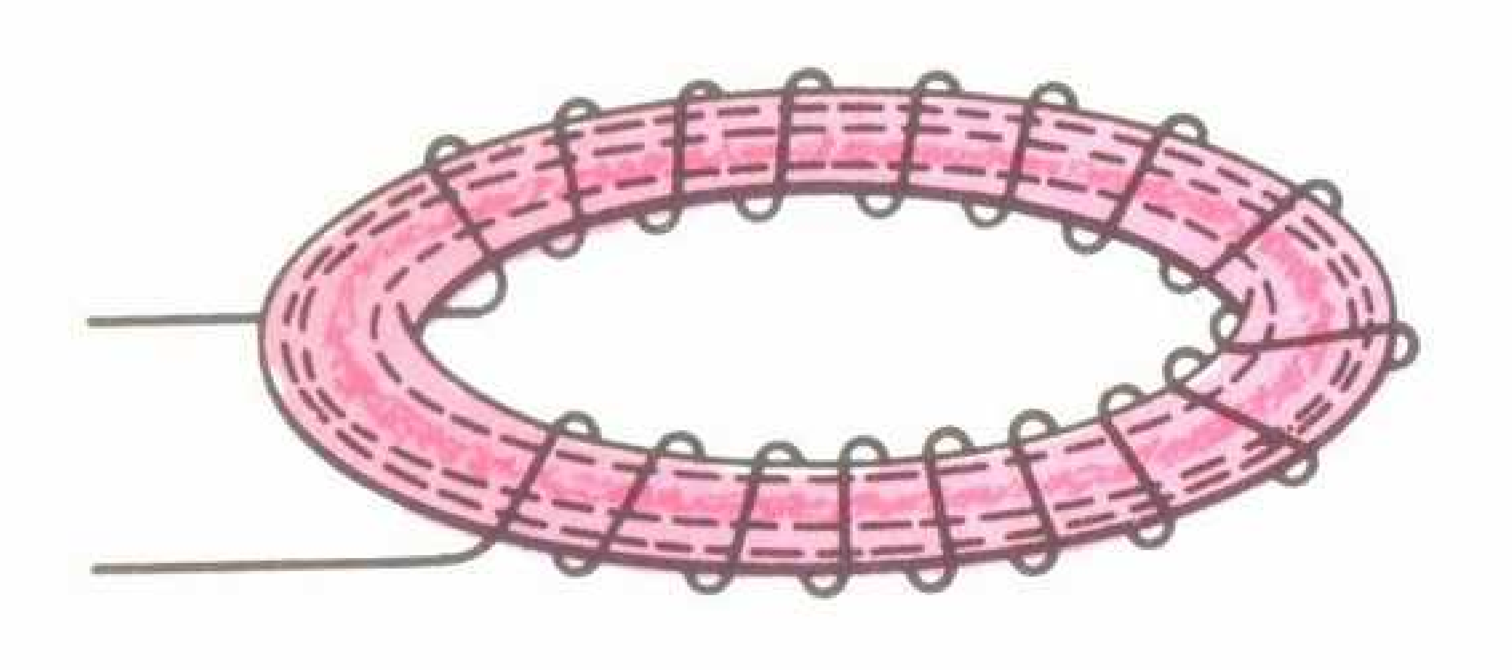


Fig. 3-46 A. Efecto de compresión de un campo magnético sobre "líneas de corriente" de plasma. (Configuración teórica).

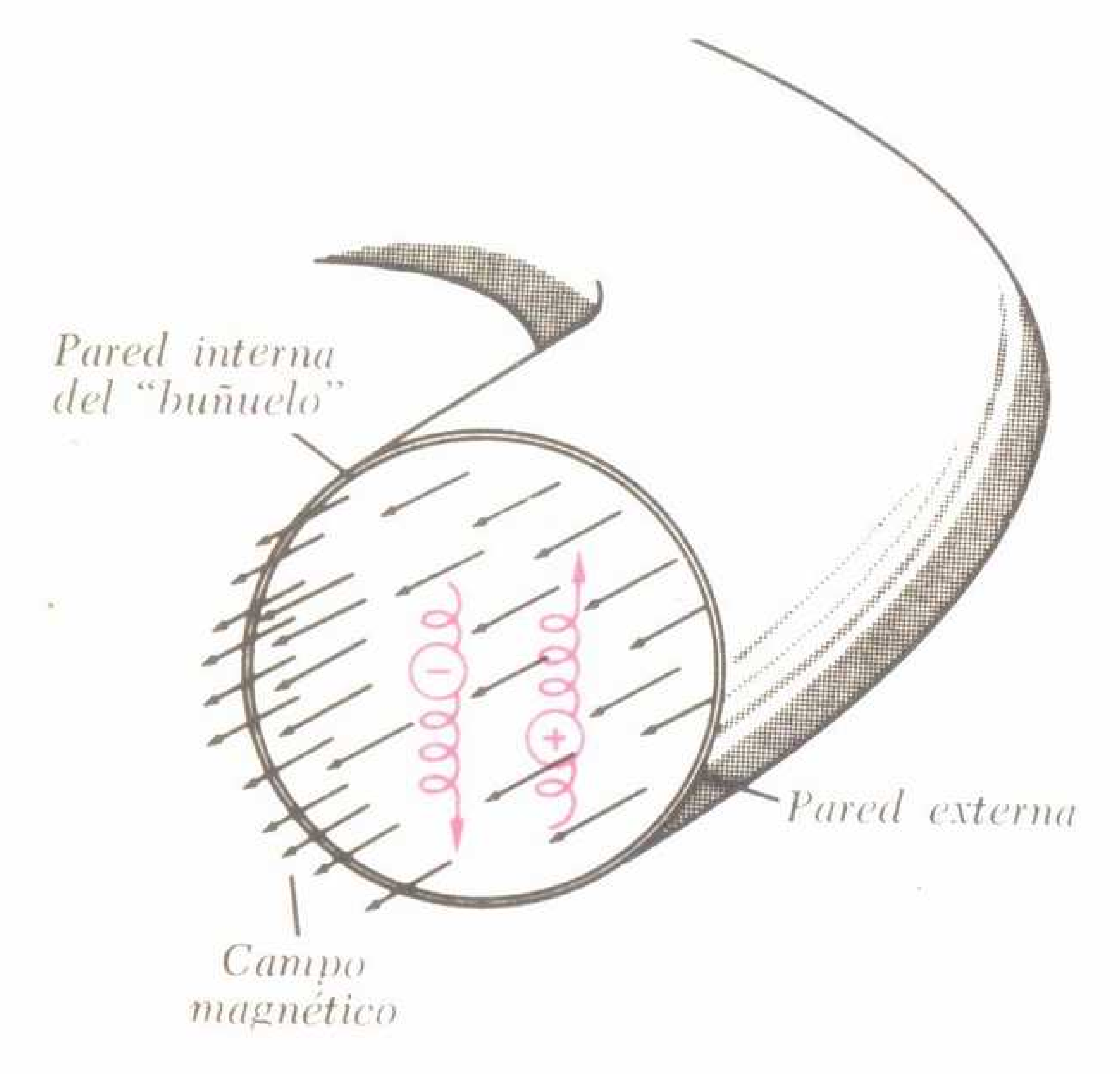


Fig. 3-46 B. Corte a través de un tubo para plasma modelado en forma de buñuelo que ilustra los detalles de la partícula que se desplaza en forma de espiral. Obsérvese la concentración del campo hacia al parte inferior del toroide.

agua de mar, comenzó a centrarse en el manejo del plasma de deuterios que, cuando su temperatura se elevaba hasta aproximadamente 100.000.000°C, no contenía ya mas moléculas de gas sino que en realidad se convertía en una masa de electrones orbitales sueltos e iones positivamente cargados. Desde el primer momento se comprendió que sería necesario comunicar alta energía cinética a los componentes del plasma para asegurar la posibilidad de una reacción de fusión controlada.

Para producir el resultado deseado,. se debe impedir que el plasma esté en contacto con las paredes de la "botella" que lo contiene, que ocasionaría una pérdida de energía por radiación electromagnética (rayos X). Se logra una forma de *elemento de contención* del plasma mediante la aplicación de un campo magnético al interior de una cámara modelada en forma de buñuelo (fig. 3-46 A). El campo actúa como "espejo" magnético, que aparta o "mantiene alejadas" las líneas de corriente de plasma respecto a las paredes, en tanto que las partículas de plasma se desplazan en espiral en direcciones opuestas que forman ángulos rectos con respecto al campo (fig. 3-46 B).

Desafortunadamente, inmediatamente se produce la inestabilidad. Las colisiones entre iones y electrones hacen que éstos salten de una a otra línea de fuerza de guía, dando por resultado su difusión a través del campo. En un recipiente recto (cilíndrico), para alojar plasmas, en los extremos se produciría un escape adicional de las partículas si en ese momento esas partículas se estuvieran desplazando *a lo largo* de las líneas de fuerza.

En 1950, Lyman Spitzer de la Universidad de Princeton, concibió la idea de retorcer al "buñuelo" para que tuviera la forma de un "8". El *Stellarator* resultante, (fig. 3-47), posee un arrollamiento de excitación para producir un fuerte campo magnético en el tubo, un transformador para inducir corriente para el calentamiento del plasma y otro arrollamiento para calentar adicionalmente al gas ionizado. Posteriormente, el diseño en forma de "8" dio paso al "buñuelo" más simple, o modelo de "circuito de carreras" (fig. 3-48). La nueva máquina estaba provista con un arrollamiento de *campo* especial que confinaba al plasma y mejoraba su estabilidad.

La investigación está aún en marcha, con "tiempos de contención" desde microsegundos hasta milisegundos. Queda mu-

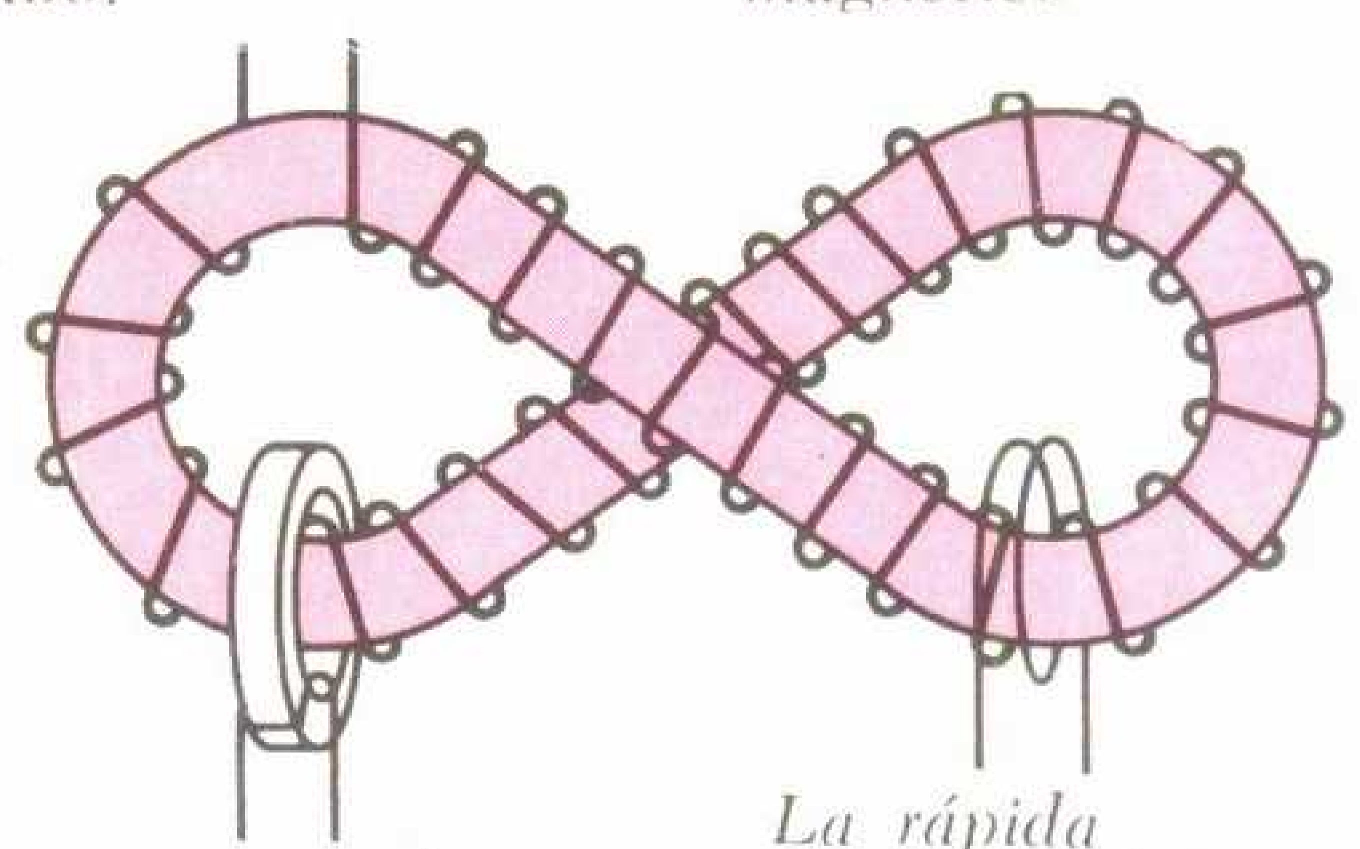


Fig. 3-47. Diagrama del primitivo Stellarator que tiene la forma del número ocho.

cho por hacer antes de que se resuelvan los problemas de temperaturas, pérdidas de energía e inestabilidad del plasma.

Un grupo de cinco científicos del Laboratorio de Radiación de Lawrence anunciaron durante uan reunión de la Sociedad de Física de los Estados Unidos de Norteamérica, celebrada a principios de febrero de 1971 en Nueva York, el descubrimiento de una partícula subatómica cuya vida es de 15 mil millonésimas de segundo.

Se denomina "antiomega-menos barión" y se trata en realidad de una "antipartícula" o "imagen especular" de la "omega-menos barión" descubierta en 1964.

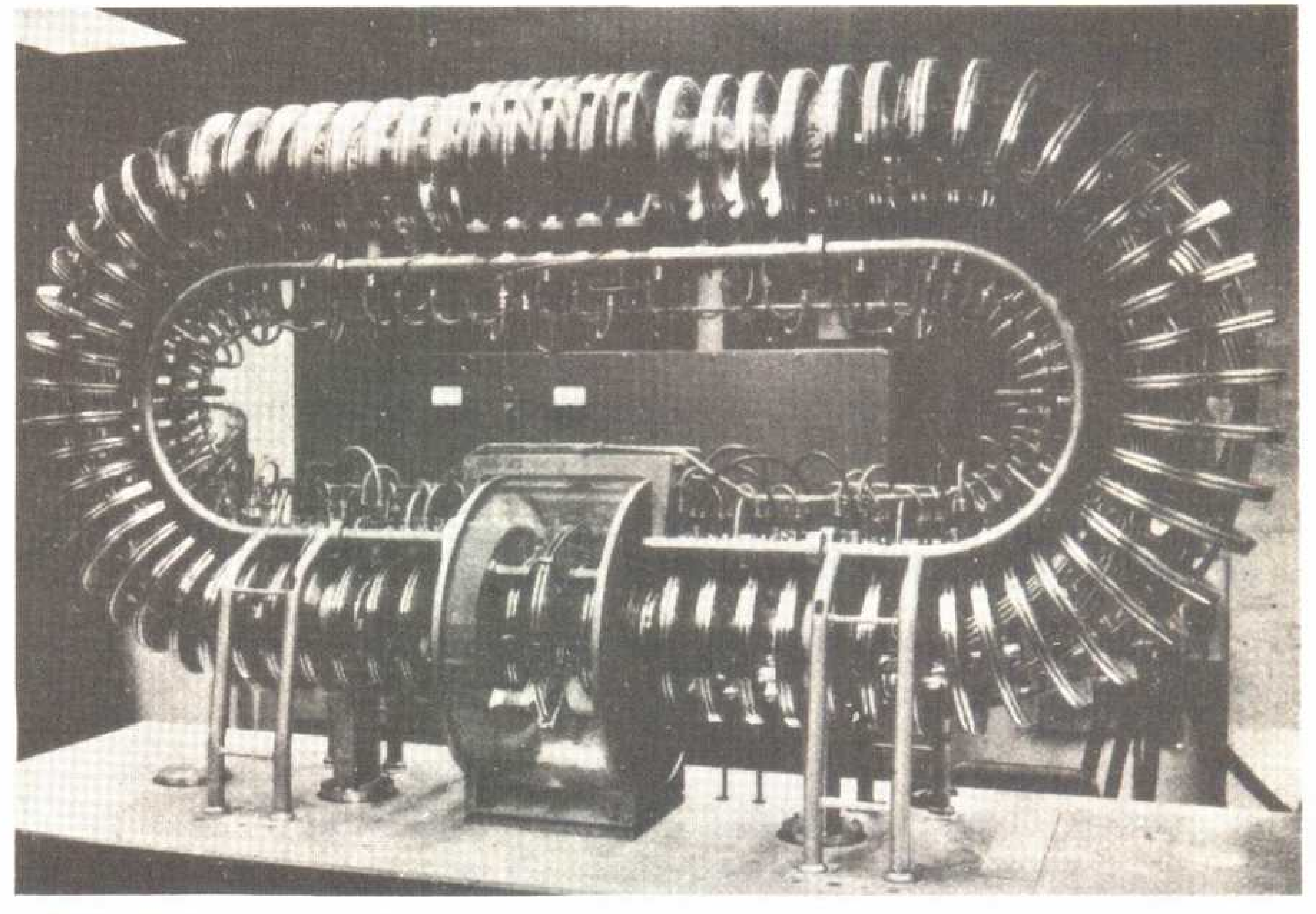


Fig. 3-48. Stellarator en forma de "circuito de carreras" (Modelo C, Tipo Studio).

REPASO

Preguntas

1 Enuncie las tradicionales leyes de la conservación de la masa y la energía en base a los nuevos principios de *masa-energía*.

2 ¿Qué es un nucleón? ¿Cómo se diferencia del núcleo?

3 ¿Cómo varía la energía de ligadura específica (energía de ligadura por nucleón) con el aumento del número atómico (Z) de 0 a 92?

4 Se puede expresar en forma lógica la masa en (*a*) caballos vapor, (*b*) caballos vapor-hora? Explíquelo.

5 ¿Por qué la fisión del uranio no produce núcleos de elementos livianos?

6 Efectúe una distinción entre las expresiones *deuterón* y *deuterio, tritón* y *tritio.*

7 Escriba los símbolos nucleares para los tres isótopos del hidrógeno. ¿Cuál de los tres es radioactivo?

8 Escriba la ecuación nuclear para la producción de neutrones mediante la reacción alfa-berilio.

9 ¿Cómo se puede diseñar un contador Geiger-Müller para contar neutrones?

10 ¿Cuál es la diferencia básica existente entre una cámara de ionización y el contador Geiger-Müller?

11 ¿Por qué es necesaria la extinción en un contador G-M? ¿De qué manera un resistor externo ayuda a extinguir cada impulso?

12 ¿Cómo puede hacerse para que un contador sea selectivamente sensible a las radiaciones alfa, beta y gamma?

13 ¿Por qué algunas veces los contadores se conectan en serie, o en *coincidencia*?

14 ¿De qué manera un medidor de velocidades se diferencia de un escalímetro?

15 Efectúe la distinción existente entre las siguientes unidades: *curie, roentgen* y *roentgen por hora.*

16 Defina el *rem*, y explique por qué es superior al roentgen como unidad física de la salud.

17 Se considera que un *dosímetro de bolsillo* —esencialmente un electroscopio cargado— es un instrumento *intregador.* Explíquelo.

18 ¿De qué manera el dosímetro personal comúnmente utilizado sirve para medir la dosis de radiación acumulada?

19 ¿Por qué no es posible que un ciclotrón acelere satisfactoriamente electrones? ¿De qué manera el sincrociclotrón supera esta dificultad?

20 Con la ayuda de un diagrama simple describa la construcción y operación de un betatrón. ¿Qué partículas acelera la máquina? ¿Cuál es su potencia útil?

21 ¿Puede un acelerador electrostático (máquina de Van der Graaf) producir el mismo resultado que el betatrón? Explíquelo.

22 En la terminología moderna un acelerador de alta potencia es un "gigatrón". ¿Para qué se lo utiliza?

23 ¿Por qué se considera al experimento de Rutherford en el que se realiza la transmutación de nitrógeno en oxígeno como reacción nuclear tipo (α-p)?

24 Efectúe una distinción entre material *fisionable* y *fértil.* Ponga un ejemplo de cada uno de ellos.

25 En función del *factor de multiplicación*, efectúe la distinción existente entre reactor *subcrítico, crítico* y *supercrítico.*

26 ¿Qué se entiende mediante la expresión neutrones *térmicos*? ¿Con qué otro nombre se designa a estos neutrones?

27 Un moderador debe tener masa atómica baja y no debe absorber neutrones en forma apreciable. Explíquelo.

28 ¿Qué se entiende mediante las siguientes expresiones: *reactor homogéneo, reactor heterogéneo, reactor enriquecido, y reactor generador*?

29 ¿Cuál es la diferencia existente entre una *pila nuclear* y una *bomba atómica*?

30 Analice la posibilidad de un motor nuclear para automóvil.

31 El plutonio se separa de las cenizas del reactor de Hanford mediante medios puramente *químicos*. La planta de difusión de gases de Oak Ridge separa U^{235} del U^{238} mediante métodos *físicos*. Explique la diferencia entre ambos procedimientos.

32 Analice las ventajas y las desventajas de la energía por fusión.

33 ¿Por qué se dice que la bomba de hidrógeno es arma de "extremo abierto"?

34 Introduzca el símbolo que falta en la reacción Co^{59} (n,——) Co^{60}.

35 Al seleccionar un radioelemento para uso terapéutico: ¿Cuál es la causa por la que nos interesa su vida media? ¿El tipo de radiación emitido?

36 ¿De qué manera una *autorradiografía* difiere de una *fotografía con rayos X*?

Problemas

1 ¿Qué cantidad de energía se produce en la destrucción de un gramo de materia?

2 La carga transportada por un electrón es $1{,}60 \times 10^{-19}$ C, y 1 V representa el gasto de 1 J/C de carga transferida. En base a lo precedente: ¿Cuál es la energía equivalente de (*a*) un eV (*b*) un MeV, (*c*) un GeV?

3 Si se bombardea $^{7}_{3}$Li mediante $^{1}_{1}$H se forman 2 $^{4}_{2}$He. Si se supone un defecto de masa de 0,0185 unidades de masa atómica: ¿Cuánto vale en MeV la energía liberada en esta reacción?

4 En el transcurso de una cierta transmutación, desaparecen 0,03 unidades de masa atómica de la masa en reposo. ¿Qué cantidad de energía se libera en Mev?

5 ¿Cuántos nucleones existen en $^{27}_{13}$Al?

6 La energía de ligadura del $^{82}_{36}$Kr es 713 MeV. ¿Cuál es su energía de ligadura *específica*?

APENDICE

UN ENFOQUE MAS AVANZADO DEL ATOMO

Recordemos en base a lo expuesto en el Capítulo 2, que el primitivo átomo planetario cuyos electrones giran alrededor de su núcleo, igual que en un sistema solar (Rutherford, 1911), se le podía objetar que los electrones que se aceleraban radialmente * emitirían ondas electromagnéticas de una frecuencia continuamente variable y debido a la correspondiente reducción en sus niveles de energía, se acercarían cada vez más al núcleo. En realidad, se sabe que los átomos excitados emiten radiaciones electromagnéticas únicamente de ciertas frecuencias *discretas* definidas. Además, el átomo normal es de índole estable y (seguramente) de dimensiones constantes.

El primer modelo atómico de Bohr (1913) fue diseñado para corregir las fallas más evidentes del prototipo de Rutherford. Bohr se dio cuenta de que tenía que abandonar los métodos de la física clásica al ocuparse de una situación subatómica esencialmente nueva. Por lo tanto, postuló una serie de órbitas estables de estado estacionario para las cuales el proceso de radiación (o de absorción de energía) estaba en realidad "prohibido". Como resultado de un salto desde un estado de alta energía a otro de baja energía, un electrón debía sufrir cierta pérdida de energía "permitida", y de acuerdo con la fórmula de Planck **, generar una radiación de frecuencia prescripta definida. Así, en lugar de una órbita de un electrón que varía continuamente y una frecuencia de radiación emitida que también varía continuamente, se afirmó que el electrón en el átomo de Bohr era capaz de una serie de cambios de energía permisibles singulares acompañados por líneas espectrales discretas (fig. A-1).

Bohr asignó primero un *número cuántico principal* (n) al electrón. Designó el nivel de energía de la órbita del electrón, suponiéndola circular. En 1915 Sommerfeld sugirió la posibilidad de *órbitas elípticas,* para explicar la estructura de líneas finas del espectro en un campo magnético (efecto Zeeman). (Las líneas espectrales "únicas" son grupos de líneas finas que están muy juntas entre sí). Se agregó un segundo número cuántico, l, para señalar la *excen-*

---

* Un cuerpo que se desplaza según una trayectoria circular, aun a velocidad constante, experimenta aceleración radial.

** Energía = Constante de Planck (h) × frecuencia.

tricidad de la órbita elíptica y el *momento angular orbital** del electrón. Debido a que el momento angular de un cuerpo es diferente para una trayectoria elíptica que para una circular, el *número cuántico orbital, l,* especificaba los subniveles de energía existentes en cualquier nivel de energía abar-

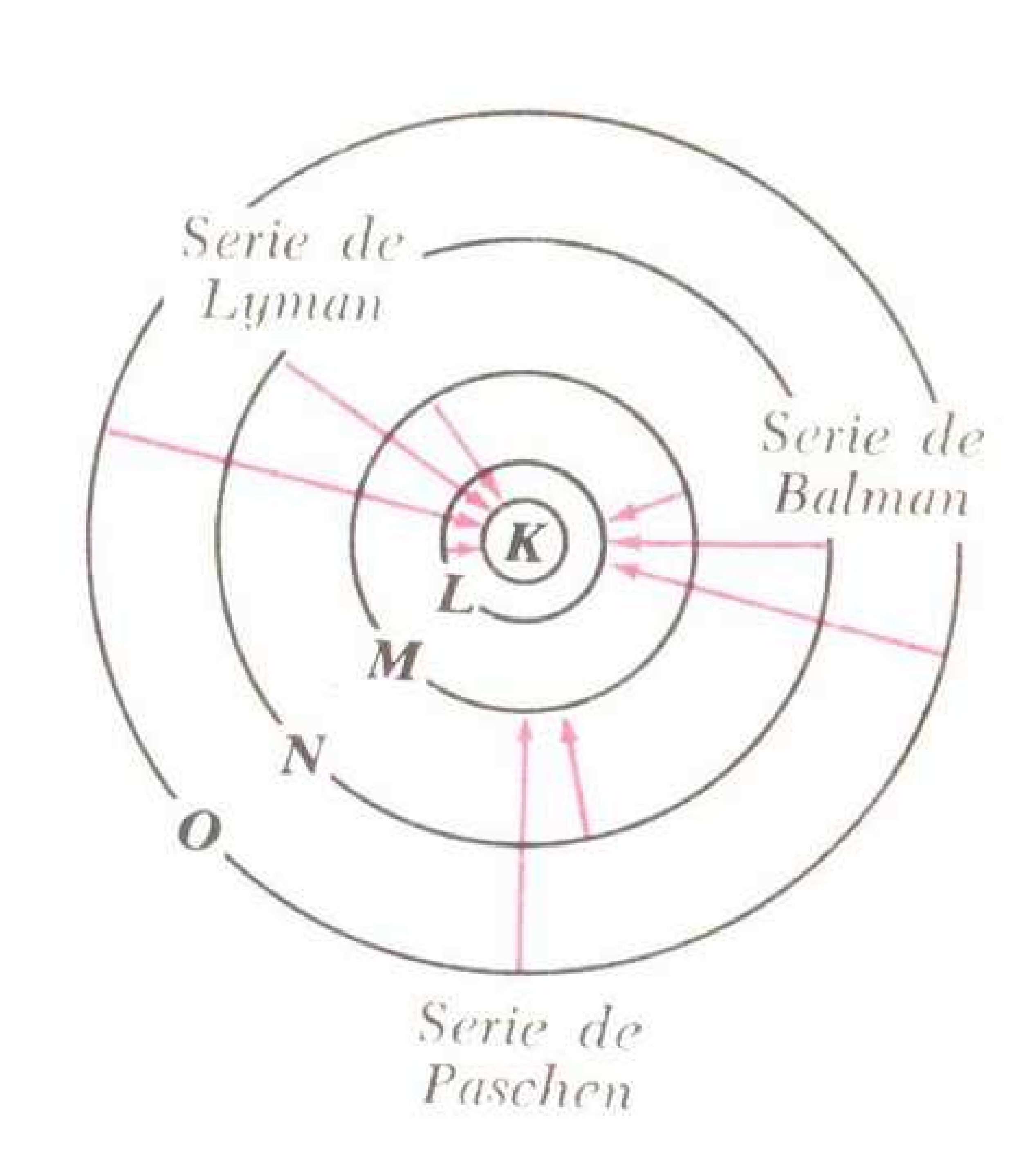


Fig. A-1. Atomo de Bohr y algunas series de emisión espectral resultantes de los saltos interorbitales de electrones Las frecuencias de la radiación representadas por las líneas espectrales en cada una de las series están matemáticamente relacionadas entre sí

cado. El valor de l varía de 0 para un máximo permitido de elipticidad, hasta $n - 1$, para una órbita circular.

En 1925, Goudsmit y Uhlenbeck postularon la existencia del *spin* de los electrones respecto a sus propios ejes (giro alrededor de los mismos). Suponiendo que se produciría una variación en el carácter de las órbitas de los electrones si se dispusieran los átomos en un fuerte campo magnético, se agregaron dos números cuánticos más: m, que determina la orientación espacial de la órbita y s que relaciona la orientación espacial del spin del electrón. Los valores de m pueden variar entre $-l$ y $+l$, y los de s pueden ser $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$, dependiendo del sentido del spin del electrón. Estos cuatro números cuánticos, conjuntamente con el *principio de exclusión* de Pauli, según el cual a dos electrones existentes en un átomo no se pueden asignar los mismos cuatro números cuánticos, especifican en forma completa la configuración de los electrones extranucleares. A partir de la fig. A-2 se pueden obtener algunas ideas respecto al significado del número cuántico orbital l y al número cuántico de spin s.

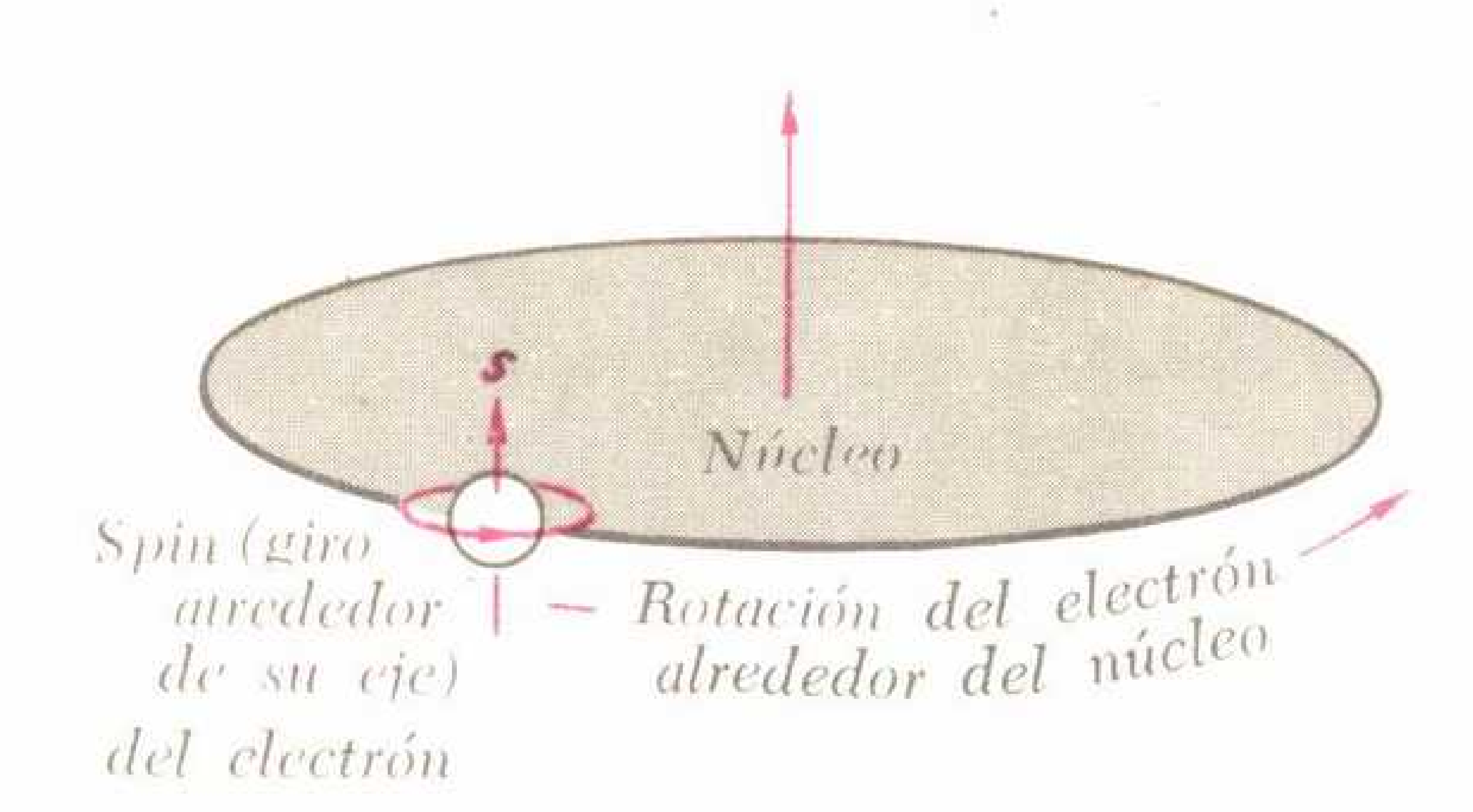
Antes de continuar con el concepto actual ondulatorio o en nube del átomo, consideremos brevemente la disposición de los electrones en las *capas* y *subcapas* del mismo y observemos cómo se llenan estos diversos niveles u órbitas a medida que avanzamos por la Tabla Periódica de los elementos. Por el momento, continuaremos considerando a los electrones como puntos que ocupan ciertas posiciones descriptas definidas.

Asignaremos las letras *K, L, M, N,* etc. a los niveles o capas de mayor energía, que también llevan números cuánticos principales, $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$,etc. La cantidad máxima de electrones que puede ocupar las capas está dada por el valor $2n^2$ y en consecuencia es 2 para la primera capa, 8 para la segunda, 18 para la tercera y 32 para la cuarta. Las capas también pre-

* Se define el momento angular de una partícula giratoria como el producto de su momento lineal, mv, por el radio de su órbita, r.

sentan una estructura de subcapas de líneas finas. En las capas ilustradas en la fig. A-3, las cubcapas *s* pueden retener un máximo de 2 electrones (de spins dirigidos en sentido contrario); las subcapas *p*, 6 electrones; las subcapas *d* 10 electrones y las subcapas *f*, 14 electrones. Las consideraciones de la mecánica

Fig. A-2. Momentos angulares correspondientes al electrón girando en órbita y sobre sí mismo existentes en el átomo de hidrógeno. El primero está caracterizado por el número cuántico l y el segundo por s.



cuántica y el principio de exclusión de Pauli determinan el número de electrones que se pueden asignar a cada capa y subcapa, u orbital.

Consideremos al más simple de todos los átomos, el hidrógeno ($Z = 1$). El átomo queda totalmente determinado mediante los números cuánticos $n = 1$ (capa *K*), $l = 0$, $m = 0$, y $s = + \frac{1}{2}$. El electrón único que gira alrededor del núcleo, ocupa la subcapa *s*. En consecuencia, simbolizamos la disposición del electrón del átomo de hidrógeno como $1s^1$, en el que el coeficiente *1* se refiere a la capa del primer nivel, la letra *s* al primer orbital, y el exponente *1* a la cantidad de electrones existentes en el orbital.

En el caso del helio ($Z = 2$), a la configuración se agrega un electrón más. Esto se efectúa en la misma capa *K* y en el mismo orbital *s* para las cuales los valores de *n, l* y *m* permanecen 1, 0 y 0, respectivamente, pero se asigna al segundo electrón el valor $-\frac{1}{2}$ para indicar un spin dirigido en sentido con-

Capas	*Subcapas*	*Cantidad máxima de electrones en la subcapa*	*Cantidad máxima de electrones para toda la capa*
N n = 4	4f	14	32
	4d	10	
	4p	6	
	4s	2	
M n = 3	3d	10	18
	3p	6	
	3s	2	
L n = 2	2p	6	8
	2s	2	
K n = 1	1s	2	2

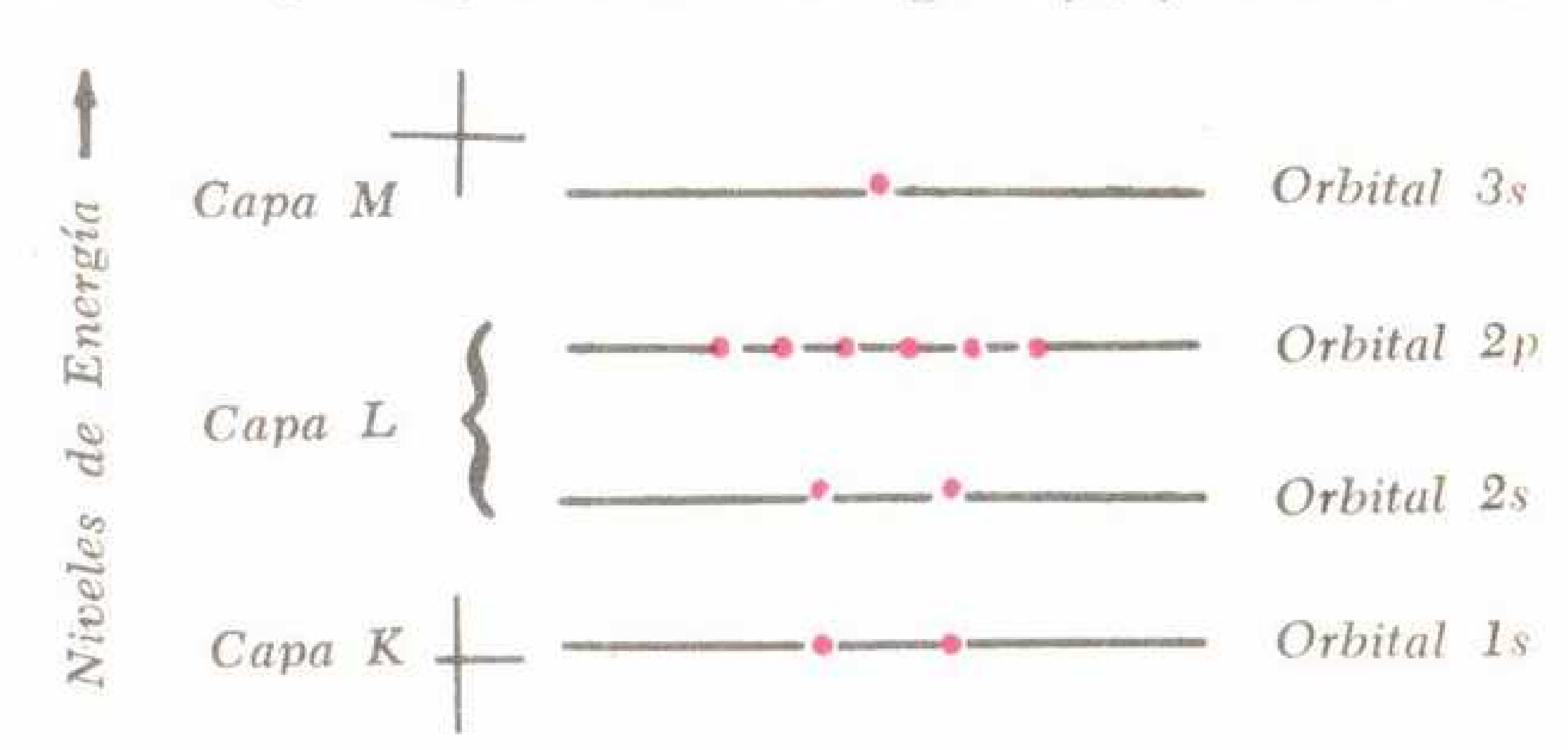
Niveles de Energía (↑)

Fig. A-3. Estructuras de las capas y las subcapas. (Obsérvese que cada número de las subcapas está identificado por el número cuántico de la capa de la cual forma parte).

trario. Ahora el orbital *s* está totalmente lleno, lo cual significa que el helio, bajo condiciones comunes, es químicamente inerte, o que su valencia es cero.

En el litio (Z = 3), que tiene un total de 3 electrones orbitales, su tercer electrón debe ocupar la subcapa 2*s* de la siguiente capa superior principal (L, o $n = 2$). Por lo tanto si se indica la configuración del hidrógeno mediante 1*s*, y la del helio $1s^2$, la disposición completa de los electrones en el litio debe designarse $1s^2$, $2s$. Este elemento (metal) reacciona fácilmente debido a la vacante única existente en el orbital 2*s*. En consecuencia su valencia es + 1.

El sodio ($Z = 11$) tiene sus capas *K* y *L* totalmente llenas, asignándose 2 electrones a la subcapa 1*s*, 2 a la subcapa 2*s*, 6 a la subcapa 2*p*, y 1 a la sub-



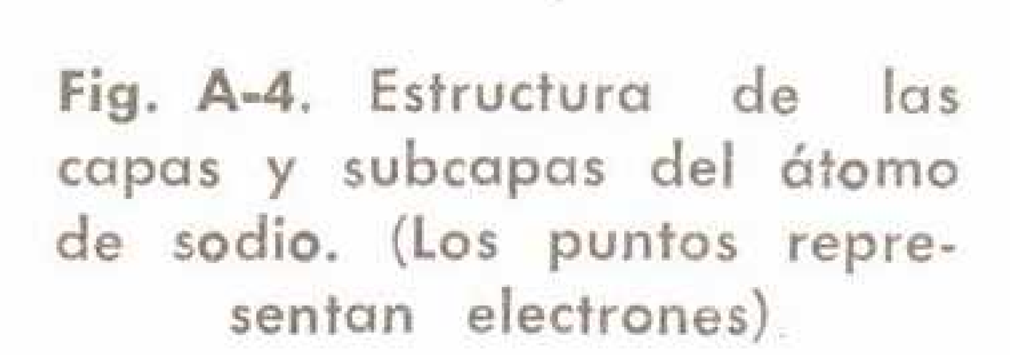


Fig. A-4. Estructura de las capas y subcapas del átomo de sodio. (Los puntos representan electrones)

capa 3*s* de la siguiente capa superior principal, *M*. En consecuencia, el símbolo para el sodio es $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^1$. Debido a que el sodio tiene sólo un electrón en su órbita externa, es también un elemento altamente reactivo cuya valencia es + 1. En la fig. A-4 se representa el esquema de la disposición de los electrones en el sodio.

También se ha prestado una considerable atención a la estructura del *núcleo*, carga positiva increíblemente compacta que se extiende a lo largo de un diá-

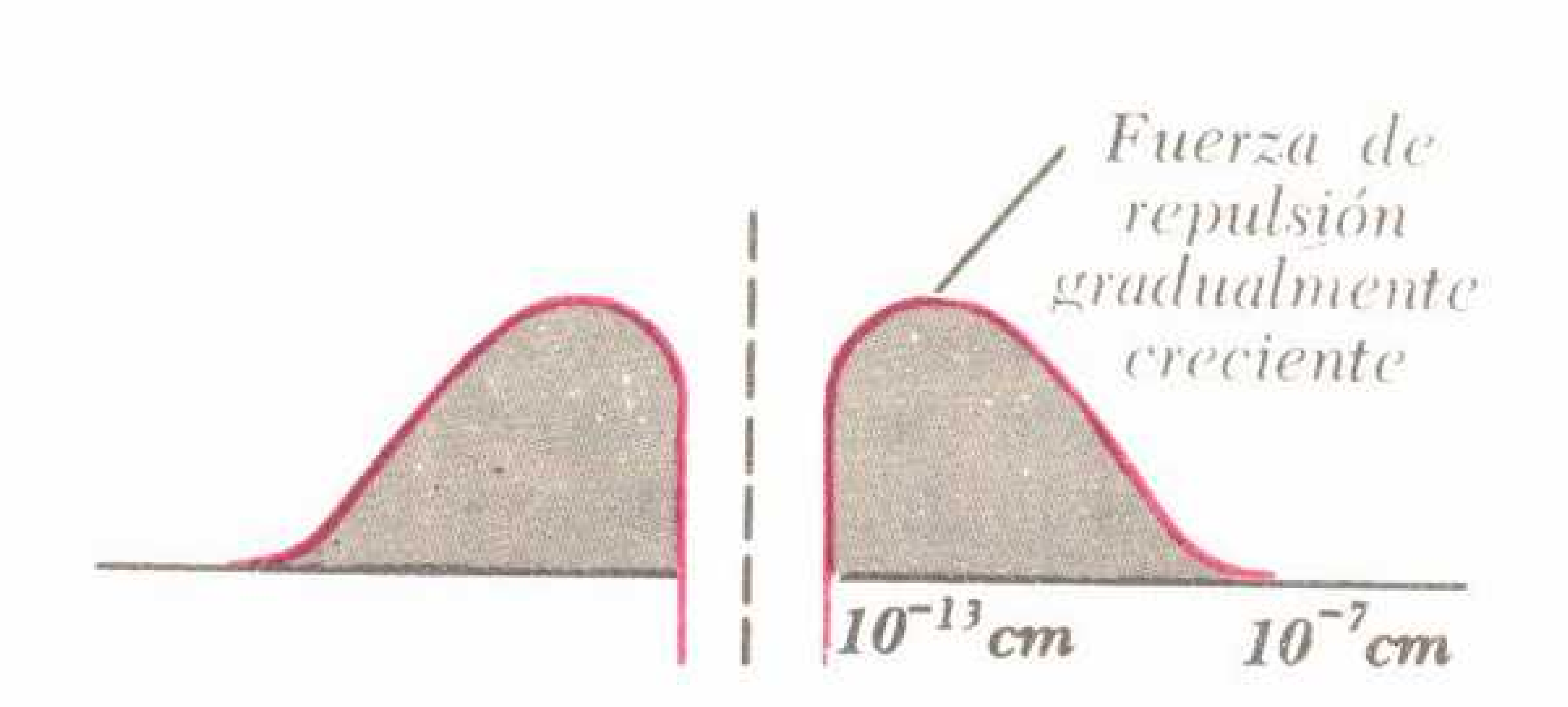


Fig. A-5. Núcleo que presenta un denominado pozo de protones a un protón que se acerca. La repulsión electrostática (fuerza de Coulomb) aumenta gradualmente a medida que el protón asciende por la pared lateral del pozo, pero ésta es reemplazada por una atracción súbita llevada a cabo por un campo de atracción de mesones de corto alcance (fuerza nuclear). Esto se produce a una distancia de aproximadamente 10^{-13} cm, punto en el cual el neutrón incidente cae en el interior del pozo.

metro de uno o varios *fermis* *. Ya nos hemos referido a la teoría de la *gota de líquido* (Capítulo 3) que explica el proceso de fisión debido a la deformación del núcleo complejo de un metal pesado contra el que choca un neutrón.

* Un fermi = 10^{-13} cm o sea 10^{-5} unidades angstrom.

Para que sea totalmente aceptable, un modelo nuclear no sólo tiene que explicar el proceso de fisión, sino también la energía de ligadura, la radioactividad y ciertos fenómenos de la denominada *espectroscopía nuclear*. La teoría de la gota de líquido no lo hace totalmente.

En el concepto de *pozo de potencial* de Bethe, el núcleo positivamente cargado actúa como un pozo, atrapando a otra partícula positiva tal como un protón, *cuando disminuye la distancia entre ellos, a 10^{-13} cm*. A distancias mayores, el pozo actúa como una colina que debe ser superada venciendo la fuerza de repulsión electrostática. Esto está ilustrado en la fig. A-5.

El modelo *en capas* del núcleo establece *órbitas de energía* ocupadas por neutrones y protones (fig. A-6). Un neutrón que bombardea, ⓝ, intercambia

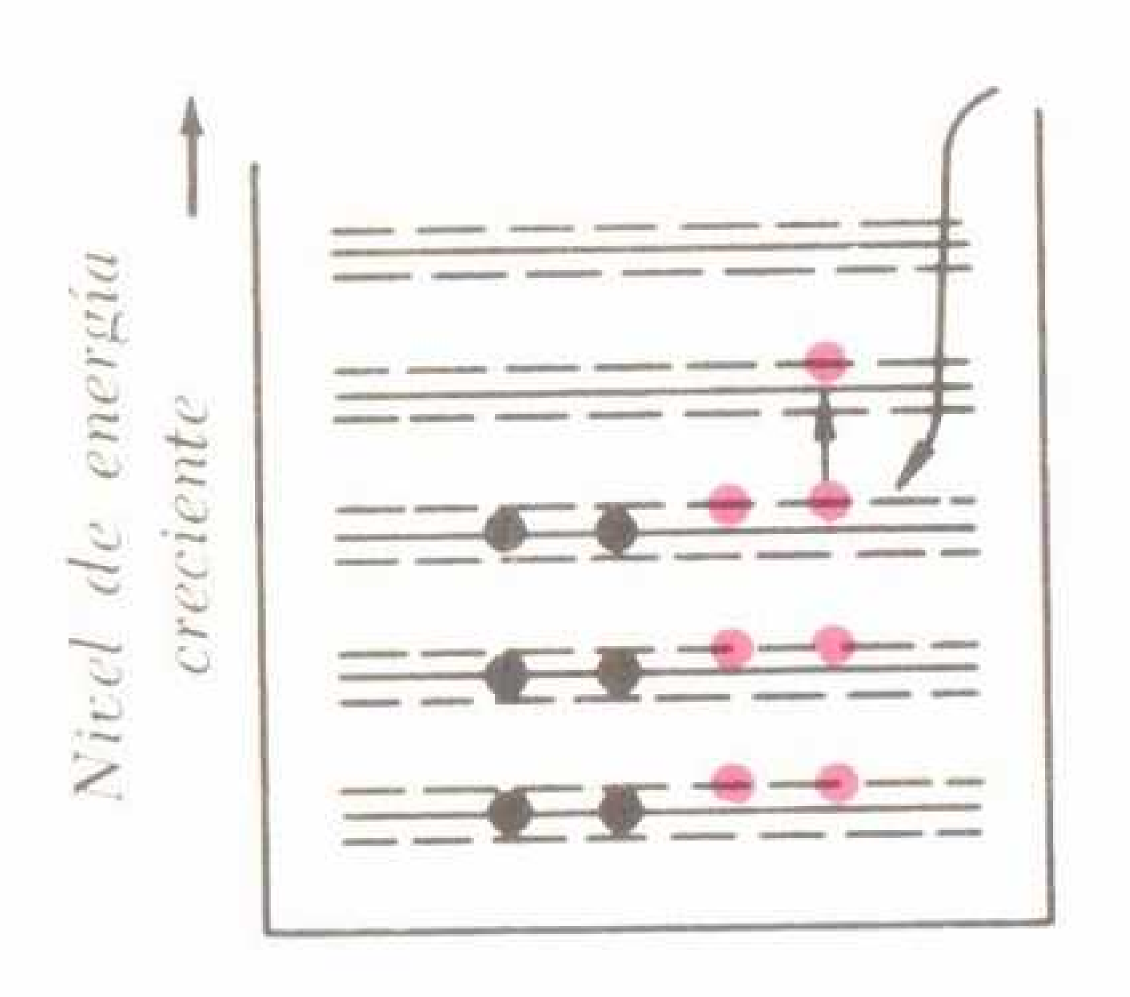


Fig. A-6. Diagrama de la estructura de la capa del núcleo. En cada una de las órbitas de baja energía ilustrada, están presentes dos protones (bolillas negras) y dos neutrones (bolillas rojas). Un neutrón entrante desplaza a uno de los neutrones nucleares hacia una órbita de energía superior.

energía con un neutrón existente en el núcleo, llevándolo a una órbita de energía superior. Como en el caso de los electrones orbitales, en la estructura nuclear se consideran capas y subcapas. Obsérvese que el dibujo combina las principales características tanto de la teoría de las capas como del pozo de potencial. El concepto actual abarca ambas teorías, tratando al núcleo (así como al resto del átomo) en función del número cuántico principal, momento angular orbital, y orientación espacial de las órbitas.

Volvamos ahora sobre otros desarrollos igualmente importantes que posteriormente hallaron aplicación en los conceptos del modelo atómico. En 1924, de Broglie sugirió que las denominadas partículas materiales estaban asociadas a un momento p y a un movimiento ondulatorio de longitud de onda $(\lambda) = h/p$ siendo h la constante de Planck. Esta teoría sugería que la materia podía considerarse de naturaleza ondulatoria. Tres años más tarde, Davisson y Germer, de Bell Telephone Laboratories y G. P. Thomson en Inglaterra, observaron que cuando se reflejaba un haz de electrones en la superficie de un cristal único de níquel (o, en el experimento de Thomson, se hacía pasar a través de una lámina metálica), se obtenía una *figura de difracción,* tal como se ve en la fig. A-7. Debido a que estas figuras corresponden en forma inequívoca a fenómenos ondulatorios, se tuvo a mano la evidencia necesaria para sostener la conclusión de que las partículas de materia en realidad se comportaban como ondas. Así, se estableció una nueva forma de dualismo; la radiación aparentaba ser *corpuscular,* que se desplaza según cuantos y la materia aparentaba ser *ondulatoria.* Durante algún tiempo, se utilizó la expresión "ondícula" para describir esta conducta dual casi paradójica.

El átomo de Bohr-de Broglie (fig. A-8) representa al electrón como una "onda de materia" que circunda al núcleo y se cierra sobre si misma prácticamente en forma de cuerda vibrante circular. Sólo "se permiten" (según la terminología de Bohr) aquellas órbitas cuyas circunferencias son un número ente-

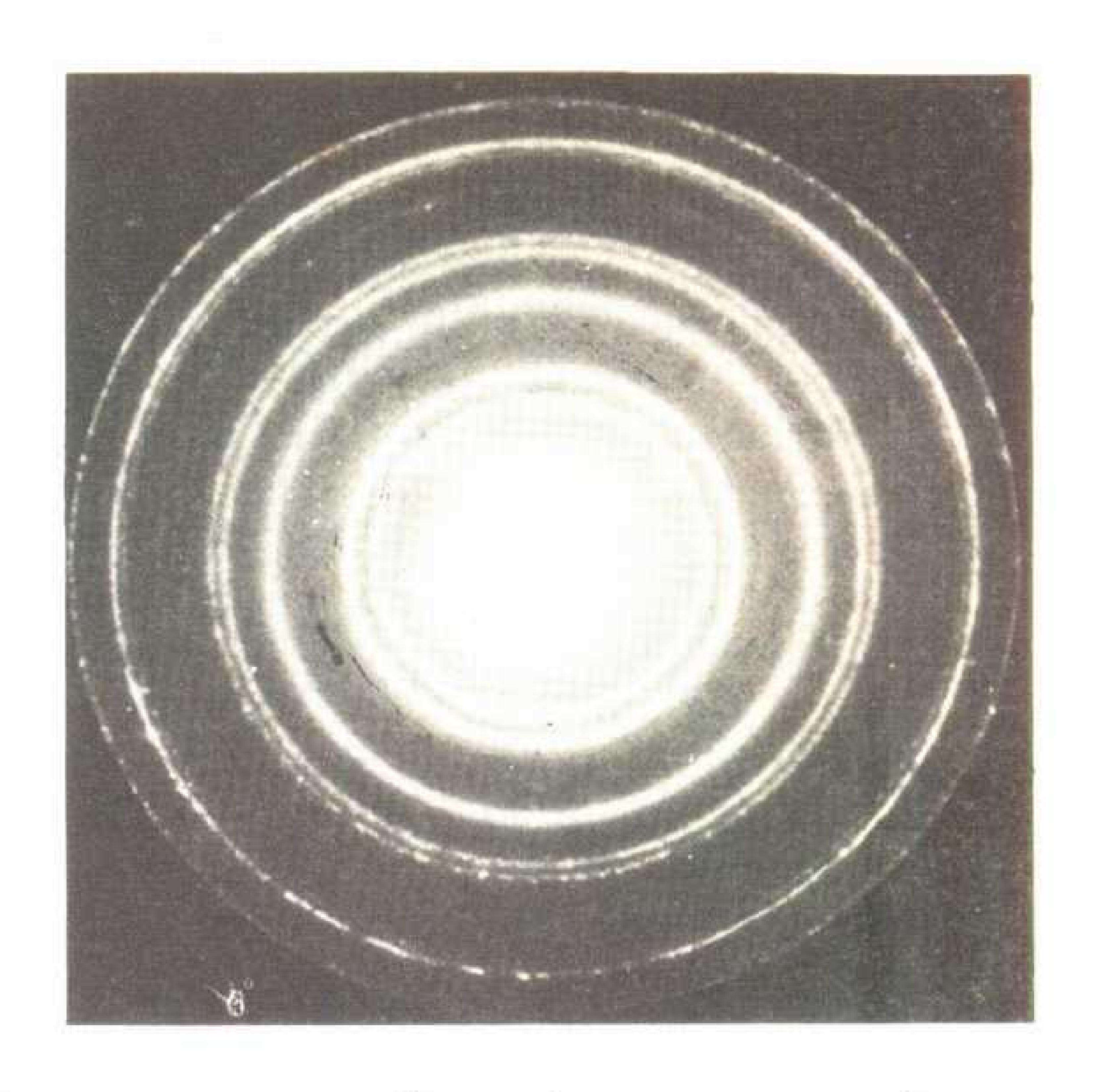


Fig. A-7. Figura de difracción de los electrones del dióxido de manganeso.

ro de longitudes de onda. Las órbitas cuyas circunferencias sean un número fraccionario de las longitudes de onda serán inestables y en consecuencia están "prohibidas", debido a que la onda de Broglie que atraviesa a dichas órbitas no podría llegar a formar un lazo cerrado.

En 1926, Schrödinger propuso un apartamiento respecto al *determinismo* aceptado hasta al fecha (relación causa a efecto) en la física y sugirió en su lugar que la trayectoria de un electrón era de naturaleza *probabilista* (es decir, sólo podía conjeturarse en base a métodos estadísticos). De acuerdo con su teoría de la *mecánica ondulatoria,* la única realidad en el interior del átomo es una *onda estacionaria* que puede vibrar según su fundamental o en armónicas. En los casos en que esta onda posea su amplitud máxima, también es máxima la probabilidad de hallar un electrón; y en los casos en que la amplitud es mínima, tal como por ejemplo en el nodo de la onda, la probabilidad de hallar un electrón es cero. De acuerdo con este razonamiento, el electrón ya no es un punto, sino más bien una "nube de probabilidad" distribuida a lo

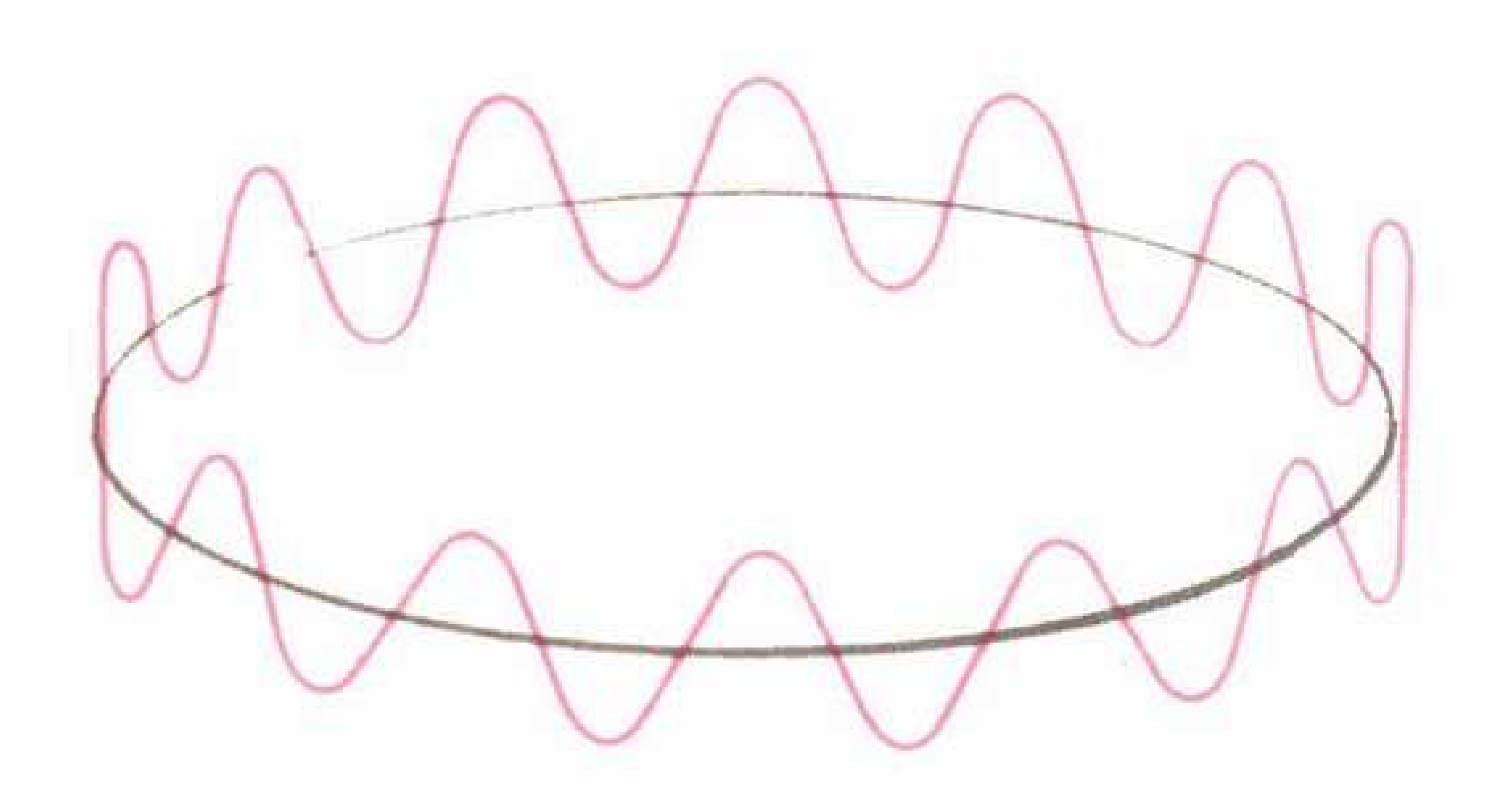


Fig. A-8 Onda del electrón de Broglie que se adapta estrechamente a una órbita de Bohr discreta y estable.

largo de todo el átomo. Por lo tanto ya no se puede hablar de una trayectoria predeterminada del electrón. En cambio, sólo podemos aseverar que un electrón es un "paquete" ondulatorio guiado según un diagrama de probabilidades.

Es difícil visualizar el concepto moderno de "nube vellosa" de una partícula subatómica, si bien se puede obtener una idea mediante la fig. A-9, que representa un modelo de núcleo en el que se ha trazado un gráfico de su

densidad de carga en función de sus distancias al centro. En forma similar, la distribución de electrones orbitales 1*s* (o en forma más precisa, su probabilidad de que se hallen en el exterior del nucleo) puede asemejarse al diagrama que se ilustra en la fig. A-10. Obsérvese la simetría esférica de la nube con referencia a los tres ejes de coordenadas, *x*, *y* y *z*.

En la fig. A-11 se representan en estado no acoplado o no ligado nubes de

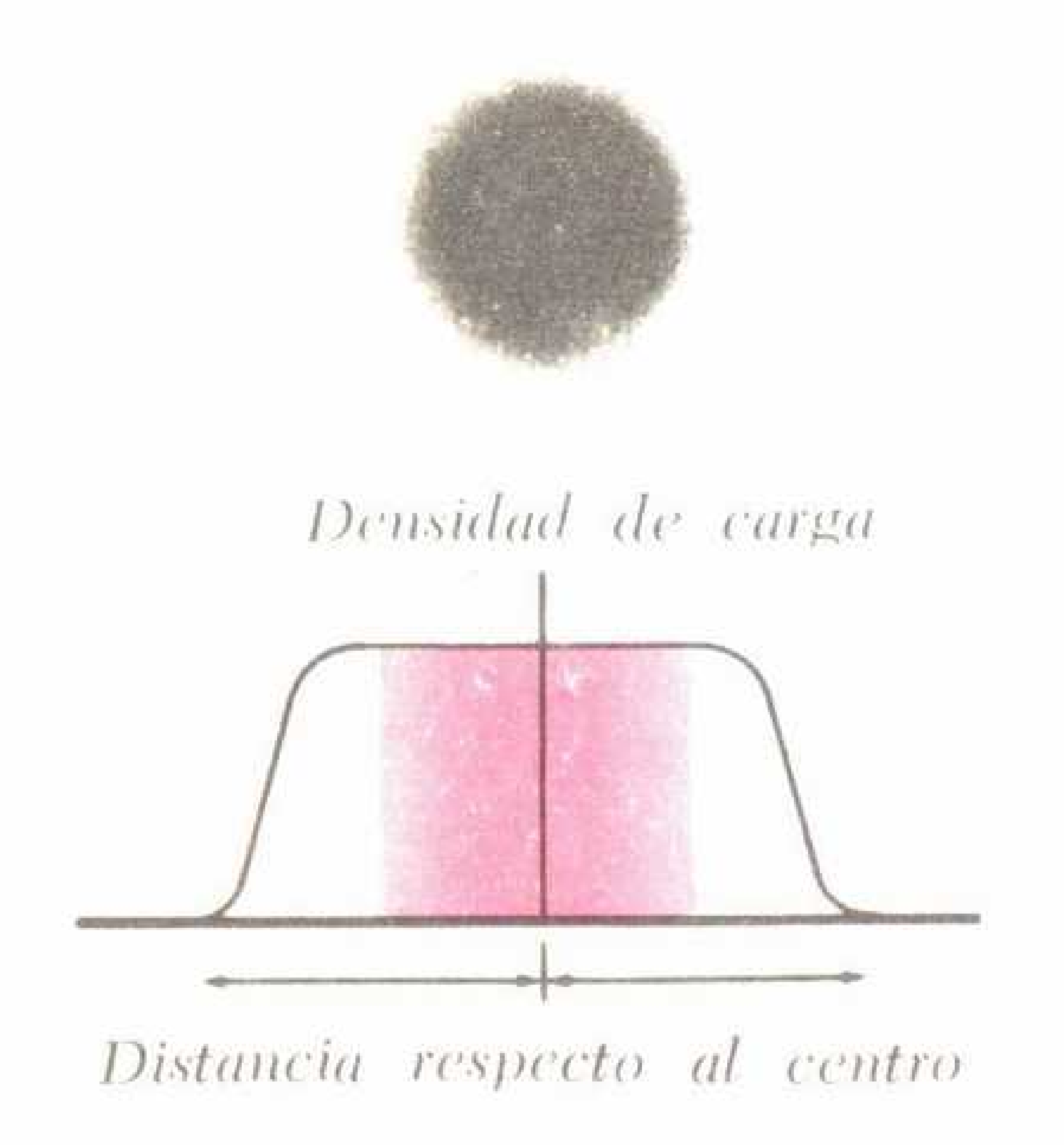


Fig. A-9. Modelo de nube de un núcleo, y distribución probable de la carga alrededor de su centro.

carga para tres diferentes orbitales 2*p* (por ejemplo, en el átomo de nitrógeno). El diagrama revela tres formas posibles de vibración que se extienden según cada una de las tres direcciones perpendiculares entre sí.

En realidad, el mundo subatómico, en contraste con el mundo en gran escala, está gobernado por el *principio de incertidumbre* (Heisenberg, 1927). En tanto que la mecánica clásica permite predicciones precisas respecto a los movimientos de, por ejemplo, los cuerpos celestes, fracasa totalmente al predecir tanto la posición *como* la velocidad instantánea de un electrón en un momento dado. En realidad, aun en mediciones en fenómenos en gran escala, el observador obra recíprocamente con el fenómeno que observa, introduciendo así error en sus datos. Sin embargo, en esas mediciones este error es despreciable. Por el contrario, cuando se trata de una partícula subatómica, tal como el electrón, es imposible especificar, con algún grado aceptable de precisión, su posición instantánea y su velocidad sin introducir dos errores, Δx (error

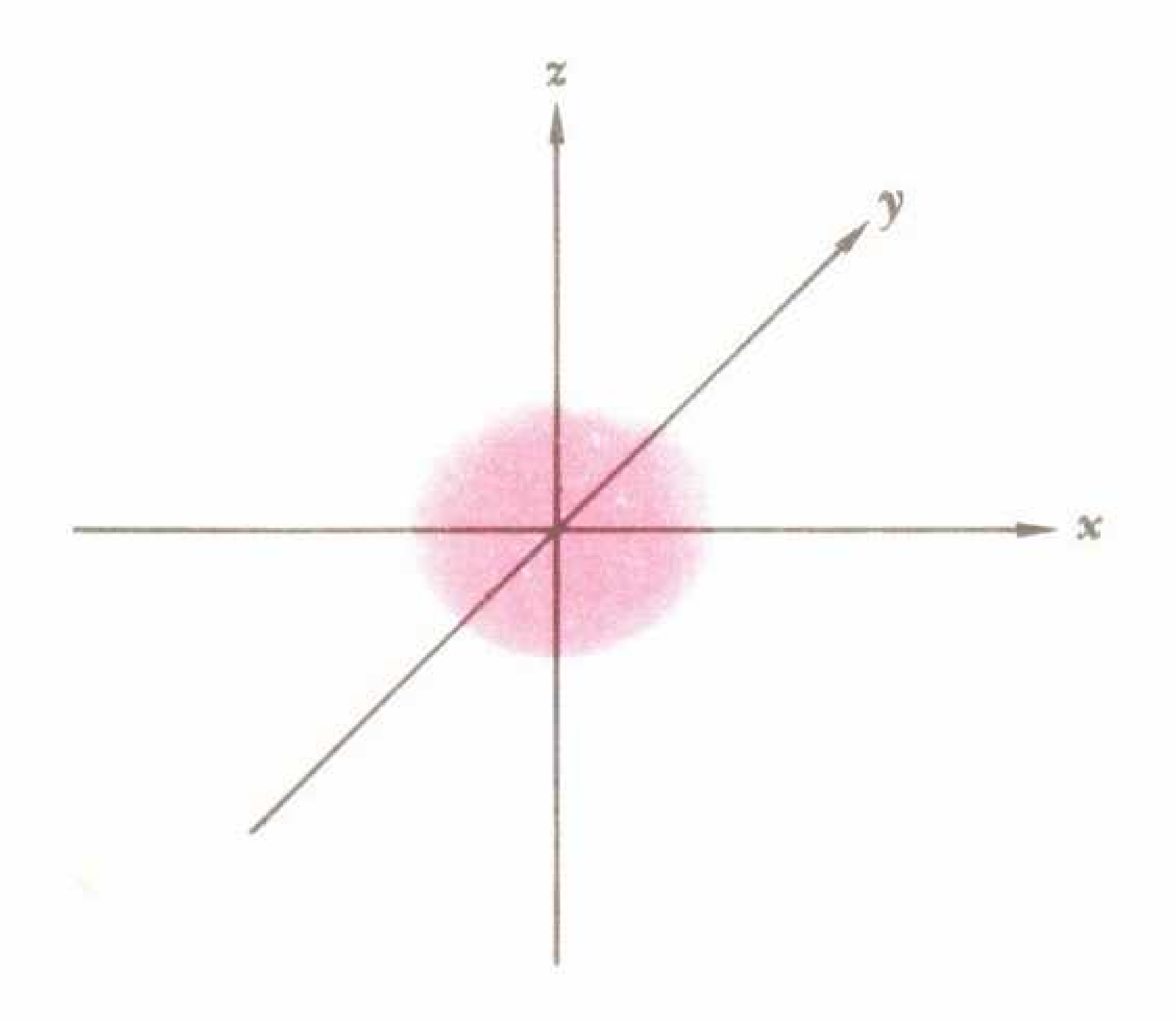


Fig. A-10. Nube que ilustra la situación probable de un electrón en el orbital 1s. Es más probable que el electrón se halle en los lugares donde la densidad de carga sea más alta.

en cuanto a la posición), y Δv (error en cuanto a la velocidad), tal que su producto sea del orden de la constante de Planck, h, igual a $6{,}62 \times 10^{-34}$ J—seg.

Esta es otra contribución a la tendencia creciente hacia las probabilidades y una desviación respecto del determinismo, por lo menos en el mundo microscópico. La división entre la física clásica y la moderna se hace así más profunda, si bien los partidarios de la física moderna insisten en el hecho de que la física clásica es sólo un caso especial de lo que para ellos se presenta como un cuerpo de leyes y principios más general.

Hacia el final del primer cuarto de este siglo, los investigadores de los fenómenos subatómicos conocían sólo el *protón* y el *electrón*. Desde entonces, se han descubierto más de 40 partículas elementales, cada una de ellas caracterizada por su propia masa, carga eléctrica (o ausencia de carga), spin, momento angular y período de vida. Las *antipartículas* *, que tienen la misma masa, spin y lapso de vida, pero que transportan carga de signo contrario, fueron teóricamente predichas en 1927 por P. A. M. Dirac, y ya han sido experimentalmente confirmadas y agregadas a la lista. El *neutrón* sin carga, descubierto por James Chadwick en 1932, tuvo posteriormente un "anti-compañero" (el *antineutrón*) de la misma carga cero pero de spin opuesto. En todas estas in-

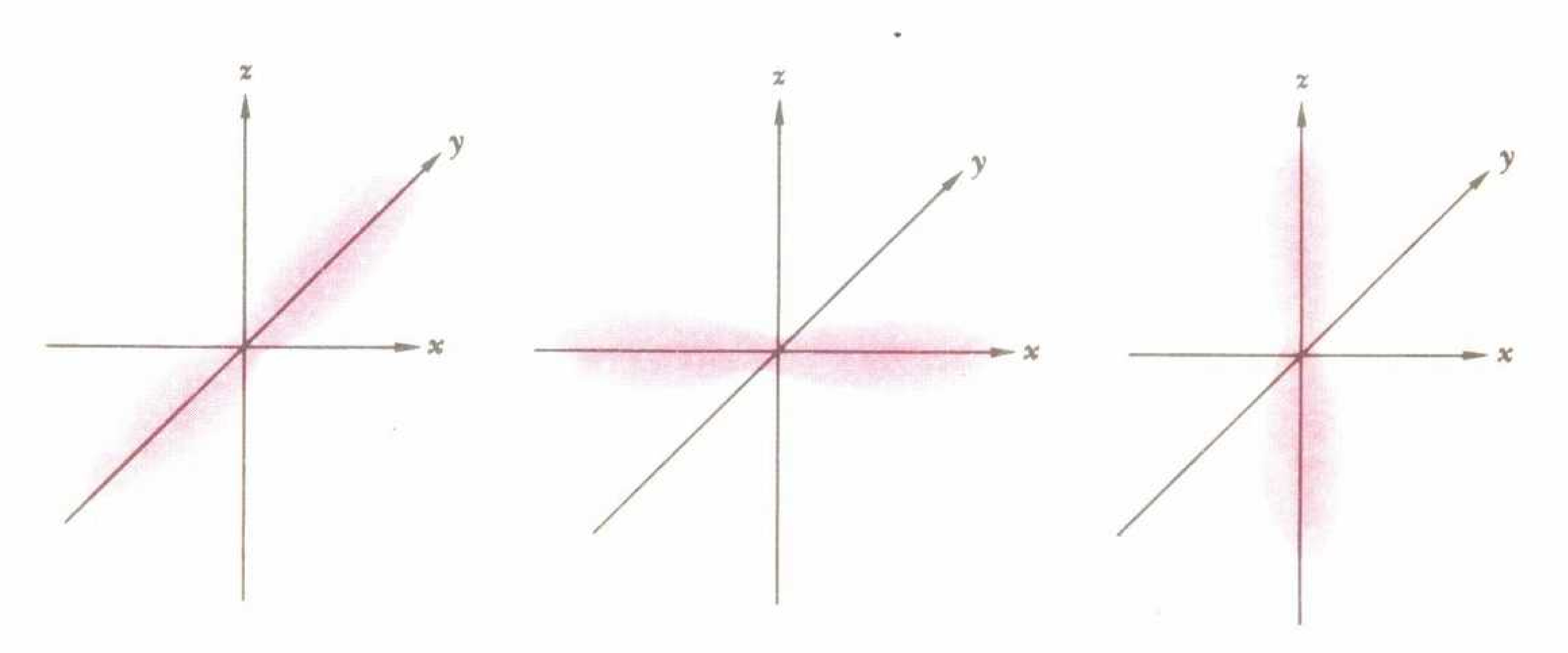


Fig. A-11. Nubes de carga en los tres orbitales 2p del átomo de nitrógeno.

vestigaciones, se utilizó la nueva *mecánica cuántica* que se desarrolla rápidamente, aceleradores de partículas de potencia creciente y cámaras de nube formadoras de trayectorias, cámaras de chispas y cámaras de burbujas.

Por razones de conveniencia, clasificamos a estas partículas como *leptones*, *mesones* y *bariones*, basando nuestro agrupamiento en sus masas relativas (tomando como unidad la masa del electrón en reposo). Las partículas tales como el *deuterón*, *tritón* y *partícula alfa* se omiten en la siguiente Tabla de Partículas Fundamentales, debido a que son de naturaleza *compuesta* y están formadas por un protón y un neutrón, un protón y dos neutrones, y dos protones y dos neutrones, respectivamente. Hasta la fecha no existe un esquema más inclusivo y comprensible para clasificar las partículas elementales subatómicas.

---

* Las antipartículas se representan mediante un guión sobre el símbolo apropiado de la partícula.

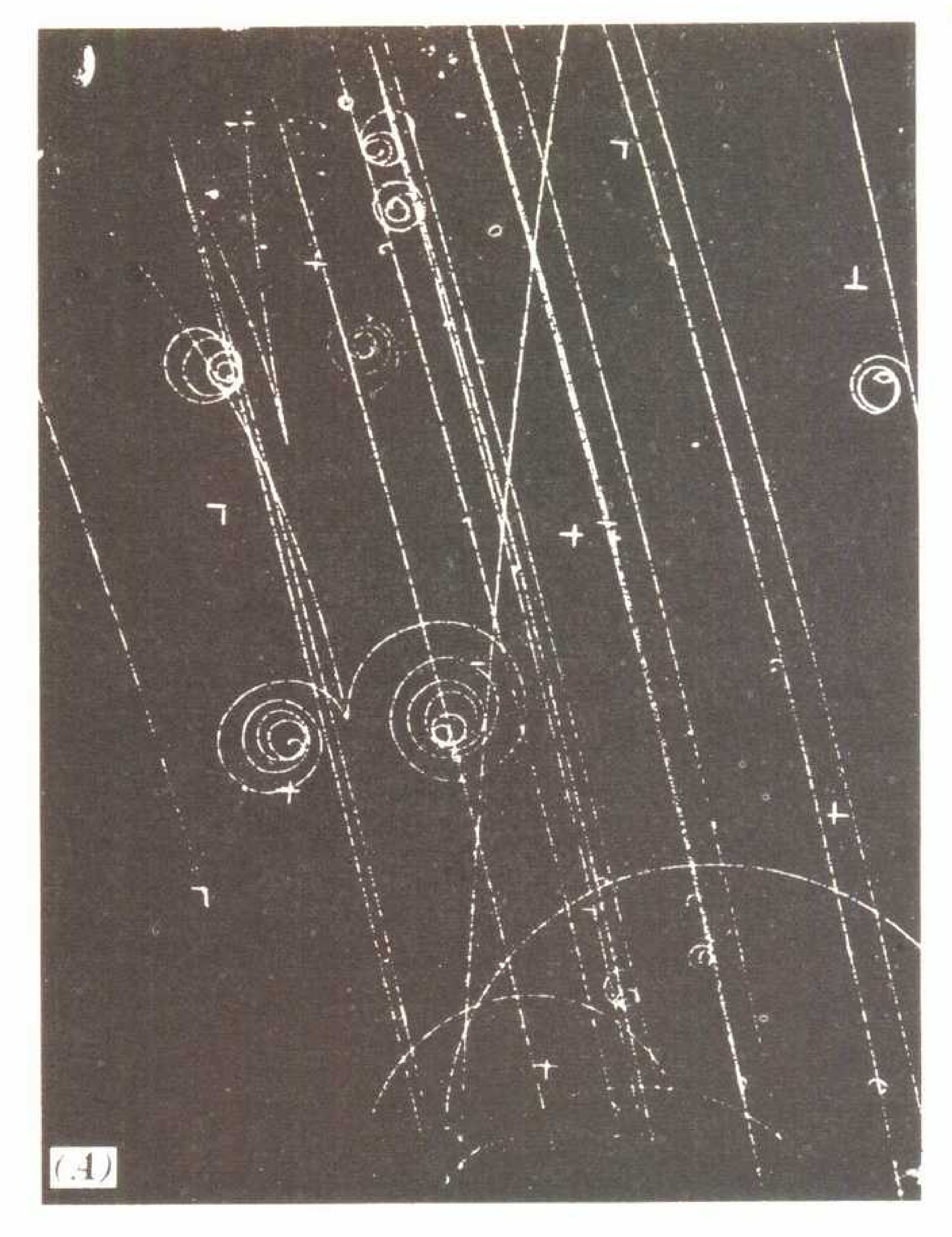
Los leptones son las más livianas de todas las partículas, variando sus masas entre 0 y 210, e incluyendo: el *electrón* propiamente dicho (e^- y e^+), el *neutrino* de masa despreciable (ν y $\bar{\nu}$), el *muón* de masa 207 (μ^- y μ^+) y el *fotón* de masa cero (γ) que sirve para transmitir energía y momento, actuando como su propia antipartícula. Todas estas partículas son estables (tienen un período de vida infinito), salvo el muón, cuyo lapso de vida medio es $2{,}2 \times 10^{-6}$ seg.

Los mesones son partículas de masa intermedia entre los que se encuentran *piones* (π^+, π^0, π^-) de masa 270 cuya vida es de $2{,}5 \times 10^{-8}$ seg, y *kaones*, o mesones K, de masa 970, con un lapso de vida de $1{,}10 \times 10^{-8}$ seg (K^+, K^0, K^-, $\bar{K}^0$). Estas partículas se producen en abundancia durante el transcurso de las colisiones entre nucleones de alta energía (neutrones y protones). Los mesones son de particular interés debido a que fueron predichos primeramente por Yukawa (1935), y posteriormente confirmados (1947) como el "dolutinante" que mantiene unidades las subpartículas nucleares.

Los bariones son partículas de gran masa, cuyo valor está comprendido entre 1 800 y 2 600 uma. El grupo incluye *nucleones* (p, $\bar{p}$, n, y $\bar{n}$) de masa 1 836 para los protones y 1 838 para los neutrones. El protón es estable, pero el neutrón se descompone en $1{,}0 \times 10^3$ seg, lo cual constituye una vida relativamente larga. Los otros miembros de la familia son los *hiperones* extrapesados,

TABLA DE LAS PARTICULAS FUNDAMENTALES

Partícula		Antipartícula		Spin	Carga	Masa relativa	Vida media
Leptones							
Neutrino	ν	Antineutrino	$\bar{\nu}$	1/2	0	Aprox. 0	Infinita
Electrón	e^-	Positrón	e^+	1/2	−1,+1	1	Infinita
Muon negativo	μ^-	Muon positivo	μ^+	1/2	1,+1	207	$2{,}2 \times 16^{-6}$ seg.
Fotón	γ	—		1	0	0	Infinita
Mesones							
Pion o mesón π Mesón π^0 neutro	π^+	Mesón negativo	π^-	0	±1,0	270	$2{,}5 \times 10^{-8}$ seg.
Kaon o mesón K− Mesones neutros K^0 y $\bar{K}^0$	K^+	Mesón K−	K^-	0	±1,0	970	$1{,}2 \times 10^{-8}$ seg.
Bariones							
Nucleones							
Protón	p	Antiprotón	$\bar{p}$	1/2	+1	1 836	Infinita
Neutrón	n	Antineutrón	$\bar{n}$	1/2	0	1 838	1×10^3 seg.
Hiperones							
Xi-hiperón	Ξ^-	Anti-xi-hiperón	$\bar{\Xi}^-$	1/2	±1,0	2 580	$1{,}3 \times 10^{-10}$ seg.
Sigma-hiperón	Σ	Anti-sigma-hiperón	$\bar{\Sigma}$	1/2	±1,0	2 330	10^{-10} seg.
Lambda-hiperón	$n\Lambda^0$	Anti-lambda-hiperón	$\bar{\Lambda}^0$	1/2	0	2 181	$2{,}5 \times 10^{-10}$ seg.



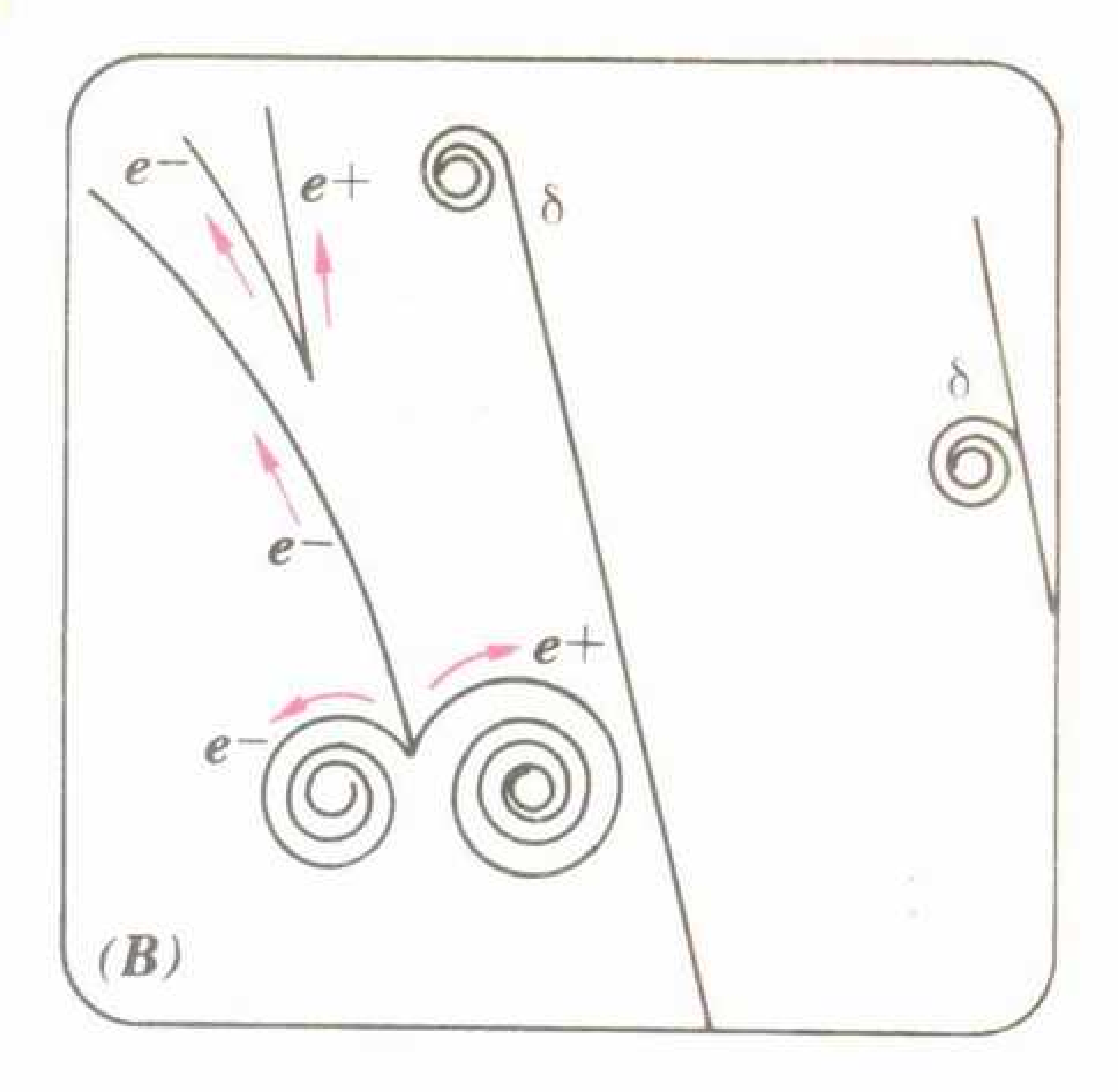


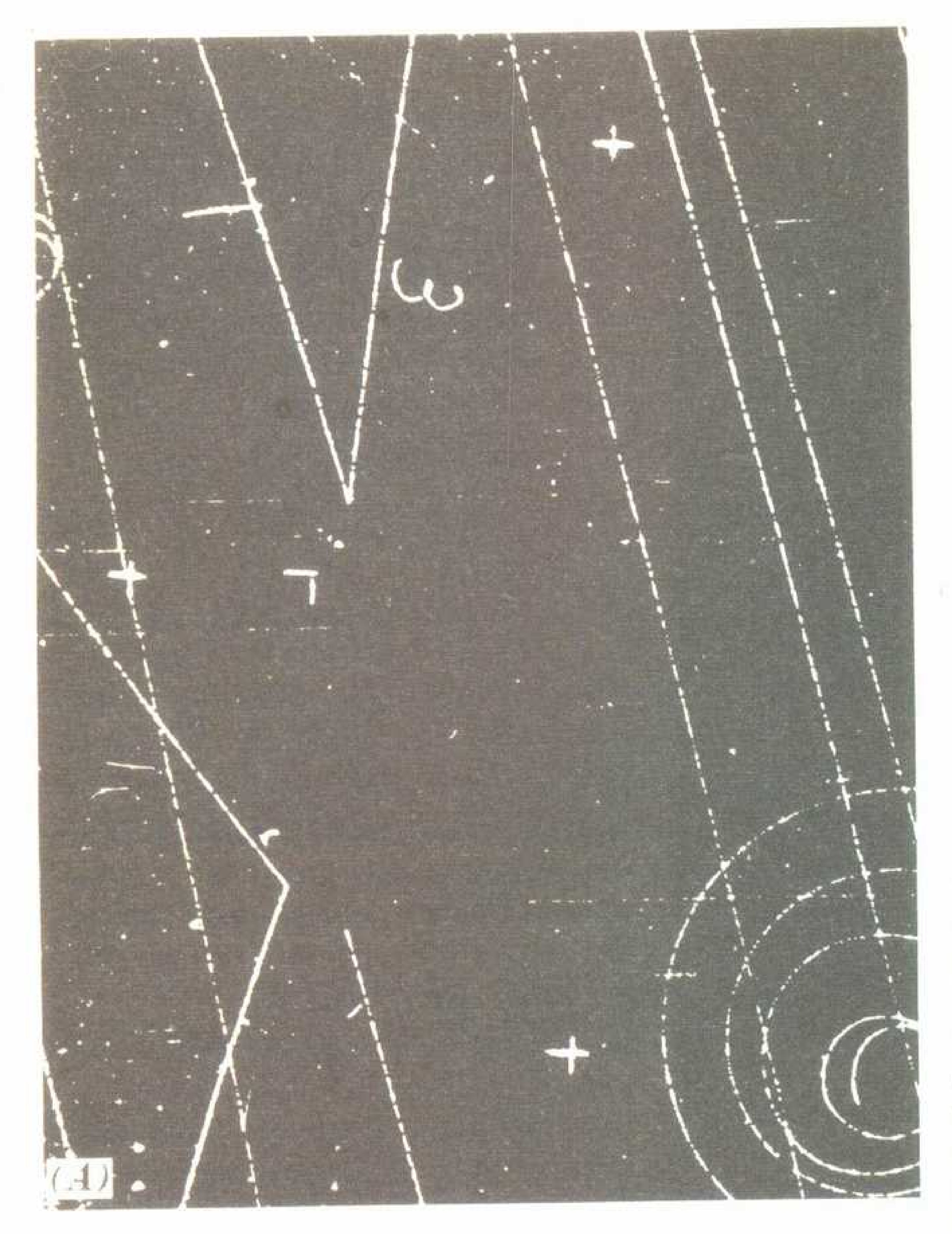
Fig. A-12. (A) Par y triplete de electrones. (B) Conversión directa de la energía en materia. Un rayo gamma se convierte en el campo de un núcleo de hidrógeno en un par electrón-positrón, que forma la V superior. El triplete inferior está formado por un par similar y un electrón adicional expulsado del átomo de hidrógeno cuando el rayo gamma se transformó en el campo del electrón orbital. También se observan ejemplos de rayos delta (δ), electrones expulsados de los átomos de hidrógeno por partículas cargadas pasajeras. Utilizado con permiso de **The Ealing Press. Fotografía original registrado por Lawrence Radiation Laboratory, Universidad de California.**

que se subdividen en los *xi-hiperón* (Ξ y $\bar{\Xi}^-$) de masa 2 580, el *sigma-hiperón* (Σ^+ y Σ^-) de masa 2 330, y el *lambda-hiperón* (Λ^0 y $\bar{\Lambda}^0$) de masa 2 181. Todas estas partículas son de carácter transitorio o inestable, siendo la vida promedio de las mismas de aproximadamente 10^{-10} seg.

Como ejemplo del esquema de la descomposición de algunas de las partículas inestables citadas, un muón negativo (μ^-) se descompone en un electrón (e^-) y dos neutrinos (ν y $\bar{\nu}$). Durante el proceso se conserva la carga. Un pión positivo (π^+) se desintegra en un muón positivo (μ^+) y un neutrino (ν), conservando nuevamente su carga. Un lambda-hiperón de carga cero (Λ^0) se disocia generando un protón positivo (p), y un pión negativo (π^-) Nuevamente, se conserva la carga.

La fig. A-12, partes (A) y (B), representa un modelo de cámara de burbujas que ilustra la conversión directa de energía en materia (caso inverso del proceso de fisión o de fusión). Un "paquete" de rayos gamma incidente genera un par *electrón-positrón* (e^-, e^+), formando la V en la esquina superior izquierda de la fotografía. El triplete inferior incluye un par similar electrón-positrón, con un electrón adicional que ha sido eliminado del átomo de hidrógeno por el rayo gamma.

Una fotografía particularmente interesante de una cámara de burbujas



π^- p
π^+ Λ°
π^- K°
π^-
(B)

Fig. A-13. (A)Producción de partículas K° y Λ°. (B) Partículas neutras que no dejan rastro hasta que se desintegran, y en consecuencia sus trayectorias se ilustran mediante líneas de trazos. El π^- (pion negativo) que ingresa por la parte izquierda inferior, reacciona con un protón para formar un mesón lambda (Λ°) y un mesón K^0 neutro. Estos a su vez se desintegran en π^- y **p**, y π^- y π^+, respectivamente. Las partículas cargadas resultantes dejan rastros en las formaciones en "V" que se observan. Resumiendo esta situación, obtenemos:

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$$
$$\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$$
$$K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$$

Obsérvese que en cada caso se conserva la carga. Utilizado con permiso de **The Ealing Press. Fotografía original registrada por Lawrence Radiation Laboratory, Universidad de California.**

(fig. A-13, partes A y B) ilustra el resultado de la interacción entre un pión negativo (π^-) que choca con un protón y da lugar a dos partículas neutras (K^0 y Λ^0). Debido a que estas últimas no transportan carga, no dejan traza tras de sí y en consecuencia se ilustran sus trayectorias mediante líneas de puntos en la figura. La partícula K^0 se descompone en partículas π^- y π^+ (parte izquierda inferior), y la Λ^0 se desintegra en una partícula π^- y un protón (parte izquierda superior).

TABLAS

Punto de ebullición de los gases licuados (presión atmosférica)

	°C	°F	°K
Helio (He^4)	—268,9	—452,0	4,2
Hidrógeno (H_2)	—252,7	—422,9	20,4
Nitrógeno (N_2)	—195,8	—320,4	77,4
Oxígeno (O_2)	—183,0	—297,4	90,1
Anhídrido carbónico (CO_2)	—78,5	—109,3	194,6
Amoníaco (NH_3)	—33,3	—27,9	239,8
Anhídrido sulfuroso (SO_2)	—10,0	14,0	263,1

Propiedades térmicas de los sólidos y los líquidos

Sólidos

	Calor específico (cal/g°C)	Punto de fusión (°C)	Calor de fusión (cal/g)	Coeficiente de dilatación lineal (por °C)
Aluminio	0,22	659	94	24×10^{-6}
Cobre	0,092	1.083	49	17×10^{-6}
Oro	0,031	1.063	16	14×10^{-6}
Níquel	0,11	1.455	56	13×10^{-6}
Platino	0,032	1.774	27	9×10^{-6}
Plata	0,056	961	26	19×10^{-6}
Estaño	0,054	232	14	27×10^{-6}
Cinc	0,093	419	23	26×10^{-6}

Líquidos

	Calos específico (cal/g°C)	Punto de ebullición (°C)	Calor de vaporización (cal/g)
Alcohol etílico	0,46	78,3	204
Alcohol metílico	0,58	64,7	263
Tetracloruro de carbono	0,20	76,7	46
Eter	0,55	34,6	89
Mercurio	0,03	357,0	71
Agua	1,00	100,0	540

INDICE ALFABETICO

EL MUNDO DE LA ENERGIA NUCLEAR

Este libro ofrece una explicación excepcionalmente clara y completa sobre la compleja naturaleza del átomo, los pasos que fueron necesarios para desentrañar su misterio y los progresos obtenidos en la liberación y control de su energía interna. El estudio abarca desde la estructura atómica y subatómica, la radiactividad natural y los isótopos, hasta conceptos más avanzados, como los siguientes: relación masa-energía, fisión nuclear y aplicaciones en los modernos aceleradores, física del plasma y de la salud, y energía nuclear en el espacio.

La serie Hayden de Física Moderna, que se presenta en volúmenes de formato conveniente, abarca detalladamente los conocimientos actuales de cinco de las secciones más importantes en que puede dividirse esta ciencia: **Calor, Luz, Mecánica, Materia y Energía nuclear,** y **Sonido.**

Cada libro explica con claridad los principios y leyes fundamentales de cada una de aquellas ramas. Se tratan también los últimos descubrimientos y aplicaciones prácticas. Muchas fotografías adecuadamente elegidas y dibujos bien realizados ilustran los temas estudiados.

La precisión científica de estos volúmenes será muy bien recibida por quienes desean alcanzar un mejor conocimiento de la física y su innegable contribución al perfeccionamiento de nuestro mundo. Estudiantes y lectores ávidos de información encontrarán los datos que necesitan conocer, presentados en forma clara y concisa.

Alejandro Efron, ex Presidente del Departamento de Física de la Escuela Secundaria Stuyvesant, de la Ciudad de Nueva York, ha cumplido recientemente cuarenta y tres años de distinguidos servicios como profesor, administrador y científico. Figura hoy en la lista de **Hombres de Ciencia Americanos** y ha escrito artículos para las más importantes publicaciones científicas y educativas.

S. A. EDITORIAL BELL

Efron

EL MUNDO DE LA ENERGIA NUCLEAR

BELL

5